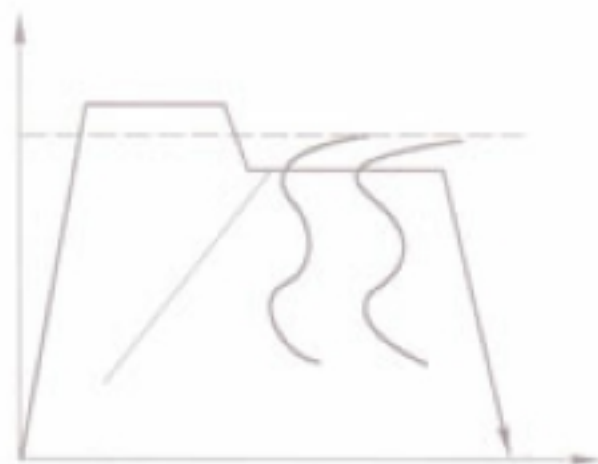


Practical  
Handbook of Heat  
Treatment

实用  
热处理手册

上海市热处理协会·编

薄鑫涛 郭海祥 袁凤松·主编



上海科学技术出版社

# 实用热处理手册

徐祖耀  
题 二〇〇八年

上海市热处理协会 编

薄鑫涛 郭海祥 袁凤松 主编

---

上海科学技术出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

实用热处理手册/薄鑫涛,郭海祥,袁凤松主编;上海市热处理协会编. —上海:上海科学技术出版社, 2009. 1

ISBN 978—7—5323—9629—0/TG·179

I. 实... II. ①薄... ②郭... ③袁... ④上...  
III. 热处理—技术手册 IV. TG156—62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 144918 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社

(上海钦州南路71号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张 47.75

字数:1450千字

2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

定价:115.00元

---

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,  
请向工厂联系调换

## 内 容 提 要

本手册是一部金属热处理专业的实用工具书。内容大量取材于国内外新近的热处理技术资料,包括实用的现场生产经验及相关的国家标准,着重反映热处理专业技术的先进性、实用性、可靠性。全书共分十章、展望及附录,内容包括金属材料及热处理基础知识,真空、感应、控制气氛及典型零件的热处理,表面改性热处理,先进渗氮技术,淬火冷却和冷却介质,热处理件的质量检测及评定分析,热处理通用设备及安全、卫生、环保、节能,新技术展望等;附录还列出了热处理行业的常用名词解释(含英文翻译)、材料及中外牌号对照、硬度换算及钢的热处理工艺经验公式等实用内容。

本手册采用图文并茂、表格化的方式,内容翔实、信息量大、文字深入浅出,是热处理工作者的一本案头书,可供从事热处理工作的科研、设计、技术、操作、管理人员及经营管理者查阅,也可供相关专业的工程技术人员参考或用作学校相关专业的教学参考材料。



## 编写人员名单

主 编： 薄鑫涛 郭海祥 袁凤松

编 委： \* 李光瑾 方顺发 章太旭 \* 屠恒悦 \* 张宏康  
\* 朱祖昌 胡明娟 华康荣 朱会文 景学庸  
沈玉明 颜志强 姚继洪 叶菊芳 杨铁刚  
孔 铭 潘守成 张智峰 夏志龙 \* 唐宗甲  
\* 陈顺民 孙文全 安 东 \* 任颂赞 陈德华  
于 晖 陈开来 王雅云 蔡庆国 \* 薄鑫涛  
郭海祥 \* 袁凤松 杨敏知 冯世铭

注：\* 为各章审核人员

执行编辑： 杨敏知 冯世铭

书名题词： 徐祖耀

(中国科学院院士,马氏体相变国际顾问委员会荣誉委员,国际贝氏体相变委员会委员,上海交通大学教授)

# 序

材料热处理工艺,如加热和冷却,是通过改变材料内部的组织,达到所需求的性能。这些内部组织及其改变是肉眼所不能察觉的,称为显微组织及其变化。不同成分的材料在不同条件(外场)下所形成的组织,及条件改变时组织变化的知识来源于材料科学(对金属材料,源自“金相学”)。热处理工件在热处理中也呈现肉眼可见的变化,如畸变、开裂等。这些是由内应力及组织变化所造成的,也需由一定知识来分析并加以避免。热处理工艺又往往是产品的最终工艺。为了保证产品质量,热处理工序的管理工作人员和操作工人都应具有所处理材料的显微组织状态及其形成和变化规律的知识。热处理设备,如加热和冷却设备,通过改变工件的传热速率和工件温度的均匀性,来影响组织转变,即影响工件热处理的性质。因此,上述人员对应用热处理工艺的设备以及加热、冷却介质的特性,也需了解。

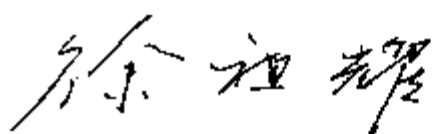
热处理工件的内部组织,有的在热处理中可能加以改变,有的则不能改变(须结合热、冷加工才能改变),因此,产品热处理前宜将一些不合格的予以检别;产品的最终检查除硬度外,有时也该作组织鉴定和成分测试,这些简易操作也应掌握。其他如车间安全、环保工作、减能排污以及降低成本等知识更不能忽视。有关人员通晓这些知识不仅能保证产品质量、生产安全和绿色工艺,还能深入一步为优化生产提供创新建议。目前整个行业急切需要集合上述知识的培训材料。鉴于此,上海市热处理协会组织专家们编写这本《实用热处理手册》,为行业从业人员提供材料热处理的基本资料和热处理生产的必要知识。

本书内容较全面,并多以图表形式呈现,方便读者随手参阅。经拜读后深感专家们不辞辛劳,精心选材,内容实用性和针对性都比较强,有些内容并具新颖性。这些特色将有利于热处理技术的不断推进,为我国工业经济的持续发展作出重要贡献。当然,手册内容在使用过程中还会不断充实修改。

这本手册行将出版之际,庆幸上海市热处理协会以及编写本书的专家们为社会作了善事,感言并乐于为本书作序。

中国科学院院士

2008年8月



# 前言

本手册由上海市热处理协会组织工厂、研究所、高等院校 30 余名专家、学者及高级技术人员编写,并大量取材于最新近的热处理国内外技术资料及发展动向,包括实用的现场生产经验及工作创见,数易其稿,历时一年半完成。

本手册既概述了金属材料热处理基础知识、常规热处理工艺及主要技术数据,又介绍了代表当代热处理发展方向的真空热处理、感应热处理、控制气氛热处理、表面改性热处理、先进渗氮技术、冷却与冷却介质等新工艺、新技术、新设备;同时列出了热处理常用设备及辅助设备的型号、主要技术参数、安全注意事项及安装调试验收等资料,供企业技术改造时参阅;另外,还兼顾热处理工作者的需求对典型零件热处理(如汽拖、动力机械、工模具、大件等)进行了较详细剖析,综述了零件热处理时的质量控制、检测方法、缺陷防止方法及失效分析,结合国情与当前节能减排工作,提出了热处理在环境保护、资源节约、优化及稳定质量、促进经济持续发展中的工作要点。

中国科学院院士徐祖耀教授和中国工程院院士潘健生教授在本手册付梓出版之际,精心指导并在百忙之中拨冗为手册作序和欣然撰写新技术发展等内容,为手册添了浓重一笔。

本手册具有针对性、可操作性、实用性和先进性强的特点。在编辑时为便于查阅,基本以图表为主,并强调数据切实可靠。为反映上海特色,手册中列述近年来国内外热处理发展动态及上海在应用热处理新技术中的经验体会,供国内企业借鉴。为叙述方便,文中涉及的常用力学性能名词大部分

以符号形式出现,其对应的名称可查阅本书附录。

手册在编写过程中得到宝山钢铁股份有限公司特殊钢分公司、上海光华印刷机械有限公司、上海电器股份有限公司人民电器厂、上海交通大学材料科学与工程学院、上海工程技术大学材料工程学院、上海柴油机股份有限公司、上海电气电站设备有限公司上海汽轮机厂、上海新闵重型锻造有限公司、上海工具厂有限公司热处理厂、上海机械制造工艺研究所有限公司、上海汽车齿轮总厂、壬喆嘉国际贸易有限公司、上海上机热处理有限公司、上海电气(集团)总公司上海重型机器锻件厂、上海工业大学嘉定通用机械有限公司、上海天安轴承有限公司、上海弘振热处理有限公司、好富顿(上海)高级工业介质有限公司、依西埃姆(北京)工业炉有限责任公司、江苏丰东热技术股份有限公司、河北太行机械工业有限公司、上海德润宝特种滑润剂有限公司、苏州工业园区姑苏电炉有限公司等单位及原上海市工业经济联合会金国志副秘书长、上海市热处理协会杨鸣顾问的大力支持,在此一并致谢。

由于时间有限,恳请热处理同仁对本手册的疏漏和不妥批评指正,以便在本手册重印或再版时更正。

上海市热处理协会

2008年8月

# 目录

<b>第一章 金属材料及热处理基础</b> .....	I
<b>第一节 钢的热处理基础知识</b> .....	1
一、铁碳合金状态图 .....	1
(一) Fe-Fe <sub>3</sub> C及Fe-C合金状态图的结构 .....	2
(二) Fe-Fe <sub>3</sub> C及Fe-C合金状态图中重要的点和线 .....	2
二、金属材料的性能与材料的选择 .....	4
三、钢的热处理原理 .....	7
(一) 钢在加热过程中的组织转变 .....	7
(二) 钢的过冷奥氏体转变 .....	8
四、钢铁的常规热处理工艺 .....	9
(一) 钢铁零件的退火 .....	9
(二) 钢铁零件的正火处理 .....	13
(三) 钢铁零件退火、正火常见缺陷 .....	14
(四) 钢的淬火 .....	14
(五) 钢在回火时的转变 .....	21
(六) 钢的冷处理 .....	24
五、合金元素在钢中的作用 .....	25
(一) 合金元素与铁和碳的作用及其在钢中的分布 .....	25
(二) 合金元素对Fe-Fe <sub>3</sub> C状态图的影响 .....	27
(三) 合金元素对钢的相变和热处理的影响 .....	28
(四) 合金元素对过冷奥氏体转变的影响 .....	29
(五) 合金元素对淬火钢回火转变的影响 .....	29
<b>第二节 碳钢、易切削钢、铸钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺</b> .....	30
一、碳钢的分类、性能及常用热处理方法 .....	30
二、碳素结构钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺 .....	30
三、碳素工具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺 .....	33
四、易切削结构钢的牌号、类型与两种状态下的纵向力学性能 .....	33
五、工程用铸钢的牌号、性能与热处理工艺 .....	35
<b>第三节 合金结构钢的牌号、性能、临界点与热处理工艺</b> .....	40
一、合金钢的分类 .....	40
二、合金结构钢的牌号、临界点与热处理工艺 .....	41
三、低合金结构钢的牌号与性能 .....	45
四、弹簧钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺 .....	45
五、轴承钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺 .....	47
六、非调质机械结构钢的牌号与性能 .....	48
<b>第四节 合金工具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺</b> .....	48
一、高速工具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺 .....	48
二、冷作模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺 .....	48
三、热作模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺 .....	48
四、塑料模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺 .....	48
五、量具刃具用钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺 .....	48
六、耐冲击工具用钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺 .....	48
七、无磁模具钢的牌号、临界点、性能与	

热处理工艺 .....	54	(二) 可锻铸铁的热处理工艺 .....	80
八、部分美国工具钢的淬火回火参考工艺规范 .....	54	四、蠕墨铸铁 .....	80
九、部分美国高速钢的淬火回火参考工艺规范 .....	55	五、耐磨铸铁 .....	81
第五节 特殊性能钢的牌号、性能与热处理工艺 .....	56	六、抗磨铸铁 .....	81
一、不锈钢的性能与热处理工艺 .....	56	七、耐热铸铁 .....	82
二、耐热钢的性能与热处理工艺 .....	61	八、高硅耐蚀铸铁 .....	83
三、耐磨钢的水韧处理 .....	63	第七节 有色金属的牌号、性能与热处理工艺 .....	83
四、高温合金的牌号与热处理工艺 .....	64	一、铝及铝合金 .....	83
(一) 高温合金牌号命名法 .....	64	(一) 铝的性能 .....	83
(二) 铁基变形高温合金的热处理工艺 .....	65	(二) 工业纯铝的牌号及化学成分 .....	84
(三) 镍基变形高温合金的热处理工艺 .....	68	(三) 变形铝合金 .....	85
(四) 铸造高温合金的热处理工艺 .....	71	(四) 铸造铝合金 .....	97
第六节 铸铁的牌号、性能与热处理工艺 .....	73	(五) 铝合金热处理常见缺陷及预防对策 .....	101
一、灰铸铁 .....	73	二、铜及铜合金 .....	102
(一) 灰铸铁的牌号与性能 .....	73	(一) 纯铜 .....	102
(二) 灰铸铁的热处理工艺 .....	75	(二) 铜合金 .....	103
二、球墨铸铁 .....	76	三、镁及镁合金 .....	113
(一) 球墨铸铁的牌号与性能 .....	76	四、钛及钛合金 .....	118
(二) 球墨铸铁的热处理工艺 .....	77	(一) 钛及钛合金的牌号及化学成分 .....	118
三、可锻铸铁 .....	79	(二) 钛及钛合金的热处理 .....	119
(一) 可锻铸铁的牌号与性能 .....	79	第八节 铁基粉末冶金材料的牌号、性能与热处理工艺 .....	125
		一、铁基粉末冶金材料的牌号和特点 .....	125
		二、铁基粉末冶金件的制造工艺流程 .....	126
		三、铁基粉末冶金材料的标记方法 .....	126

## 第二章 真空热处理 .....

第一节 真空获得技术、真空测量和真空检漏 .....	127	(二) 真空气淬 .....	143
一、真空基本知识 .....	127	(三) 其他冷却方法 .....	148
二、真空获得技术 .....	128	四、真空气淬热处理技术的发展动向 .....	148
(一) 真空热处理炉常用的真空泵 .....	128	五、真空热处理工艺 .....	151
(二) 真空系统 .....	129	(一) 真空退火 .....	151
(三) 真空系统的主要附件 .....	131	(二) 真空淬火、真空回火 .....	154
三、真空测量 .....	132	六、真空渗碳 .....	168
四、真空检漏 .....	133	(一) 常规的真空渗碳 .....	168
第二节 真空热处理工艺 .....	136	(二) 低压真空渗碳 .....	173
一、真空热处理工艺原理 .....	136	(三) AvaC 乙炔低压渗碳 .....	175
二、真空热处理加热工艺参数的确定 .....	138	第三节 真空热处理炉 .....	178
三、真空热处理的冷却方法 .....	140	一、真空热处理炉的分类及功率确定 .....	178
(一) 真空油淬 .....	140	二、真空热处理炉的主要结构 .....	179
		(一) 炉壳 .....	179

(二) 加热器 .....	179
(三) 隔热屏 .....	186
(四) 真空隔热闸门 .....	188
三、常用真空热处理炉简介 .....	189
(一) 外热式真空热处理炉 .....	189
(二) 内热式真空热处理炉 .....	189
(三) 抽空炉 .....	198
(四) 真空回火炉 .....	198
(五) 真空退火炉 .....	199
四、真空热处理炉的辅助设施 .....	199

(一) 真空热处理炉循环水冷却系统 .....	199
(二) 氮气供给系统 .....	203
五、真空热处理炉的选用、保养及其他 .....	204
(一) 真空热处理炉的选用原则 .....	204
(二) 真空热处理炉的基本技术指标 .....	204
(三) 真空炉的性能试验方法 .....	204
(四) 真空炉的验收工作 .....	205
(五) 真空炉的保养技术 .....	206

### 第三章 表面改性热处理 .....

第一节 表面加热淬火 .....	208
一、火焰淬火 .....	208
二、接触电阻加热淬火 .....	215
三、脉冲淬火 .....	216
第二节 钢的渗碳 .....	218
一、概述 .....	218
二、固体渗碳 .....	218
三、气体渗碳 .....	221
四、渗碳后的热处理 .....	229
五、渗碳件的质量检验 .....	230
六、渗碳件的常见缺陷、产生原因及防止措施 .....	233
第三节 钢的渗氮 .....	235
一、基本概念 .....	235
二、常用渗氮钢及其预备热处理 .....	237
三、气体渗氮 .....	238
(一) 工件渗氮前的准备工作 .....	238
(二) 气体渗氮工艺 .....	239
(三) 典型工件应用实例 .....	241
四、离子渗氮 .....	242
(一) 工件渗氮前的准备工作 .....	242
(二) 离子渗氮工艺 .....	242
(三) 典型工件应用实例 .....	244
(四) 离子渗氮件的质量检查 .....	245
五、渗氮件的质量检验 .....	245
六、渗氮件的常见缺陷、产生原因及防止措施 .....	246
第四节 碳氮共渗与氮碳共渗 .....	248
一、气体碳氮共渗 .....	248
(一) 气体碳氮共渗前的准备工作 .....	248
(二) 气体碳氮共渗工艺 .....	248

(三) 典型工件应用实例 .....	250
(四) 碳氮共渗用钢及共渗后的热处理 .....	250
(五) 碳氮共渗件的质量检验 .....	251
(六) 碳氮共渗件的常见缺陷、产生原因及防止措施 .....	252
二、气体氮碳共渗 .....	252
(一) 气体氮碳共渗前的准备工作 .....	252
(二) 气体氮碳共渗工艺 .....	254
(三) 气体氮碳共渗件的质量检验 .....	254
(四) 应用实例 .....	255
(五) 气体氮碳共渗件的常见缺陷、产生原因及防止措施 .....	256
三、液体氮碳共渗 .....	257
(一) 液体氮碳共渗前的准备工作 .....	257
(二) 液体氮碳共渗工艺 .....	257
(三) 液体氮碳共渗件的质量检验 .....	259
(四) 氮碳共渗用钢及共渗后的性能 .....	259
(五) 液体氮碳共渗件的常见缺陷、产生原因及防止措施 .....	260
第五节 激光热处理 .....	260
一、激光发生器 .....	261
二、激光加热金属的特点 .....	264
三、激光淬火 .....	265
(一) 激光淬火的适用钢材和铸铁 .....	265
(二) 激光淬火前的准备工作 .....	265
(三) 激光淬火工艺 .....	266
(四) 应用实例 .....	267
(五) 激光淬火件的质量检验 .....	267
第六节 气相沉积表面改性 .....	268
一、概述 .....	268





**第二节 淬硬性和淬透性** ..... 364

一、淬硬性 ..... 364

二、淬透性 ..... 364

三、影响淬透性的因素 ..... 379

**第三节 淬火冷却烈度和淬透层深度** ..... 381

一、淬火冷却烈度 ..... 381

二、淬透层深度 ..... 382

三、临界冷却直径及端淬曲线的估算 ..... 382

**第四节 淬火冷却介质的选择与检测** ..... 385

一、淬火冷却介质的分类与选择原则 ..... 385

二、淬火冷却介质的性能和质量评判 ..... 386

三、淬火冷却介质的检测方法 ..... 387

**第五节 油冷却介质** ..... 388

一、一般淬火油 ..... 389

二、专用淬火油 ..... 390

三、真空淬火油 ..... 393

四、淬火油的氧化/老化 ..... 394

**第六节 水及水溶性淬火介质** ..... 395

一、水及无机物水溶性淬火介质 ..... 395

二、有机聚合物水溶液淬火介质 ..... 397

**第七章 典型零件热处理** ..... 400

**第一节 机床零件热处理** ..... 400

一、机床导轨热处理 ..... 400

二、机床主轴热处理 ..... 402

三、机床丝杆热处理 ..... 405

**第二节 汽车、拖拉机及动力机械零件热处理** ..... 407

一、汽车、拖拉机零件热处理 ..... 407

二、动力机械零件热处理 ..... 411

**第三节 大件热处理** ..... 420

一、大型锻件热处理 ..... 420

（一）大型锻件的冶金特点 ..... 420

（二）大型锻件的锻后热处理 ..... 421

（三）大型锻件的最终热处理 ..... 427

二、轧辊热处理 ..... 436

（一）热轧锻钢工作辊热处理 ..... 437

（二）冷轧锻钢工作辊热处理 ..... 438

（三）冷硬铸铁轧辊热处理 ..... 439

三、大型重载齿轮渗碳淬火 ..... 441

（一）重载齿轮的服役条件与失效形式 ..... 441

（二）重载齿轮的热处理质量控制 ..... 441

（三）大型重载齿轮渗碳淬火工艺 ..... 441

四、汽轮机零件的热处理 ..... 442

（一）汽轮机零件的常用热处理工艺 ..... 442

（二）部分汽轮机零件的热处理 ..... 443

**第四节 量、刃具热处理** ..... 446

一、量具热处理 ..... 446

（一）游标卡尺尺身热处理 ..... 446

（二）游标卡尺尺框热处理 ..... 447

（三）标准硬度块热处理 ..... 447

二、刃具热处理 ..... 448

（一）直柄麻花钻热处理 ..... 448

（二）锥柄麻花钻热处理 ..... 450

（三）小钻头热处理 ..... 451

（四）机用丝锥热处理 ..... 452

（五）齿轮滚刀热处理 ..... 453

（六）高速切削滚刀热处理 ..... 454

（七）剃齿刀热处理 ..... 456

（八）拉刀热处理 ..... 457

**第五节 模具热处理** ..... 459

一、模具的工作条件、性能要求及材料 ..... 459

二、常用模具钢的预备热处理 ..... 463

三、常用模具钢的热处理工艺 ..... 465

四、典型模具的热处理实例 ..... 470

（一）塑料模具 ..... 470

（二）冷作模具 ..... 471

（三）热作模具 ..... 473

**第六节 紧固件、滚动轴承零件热处理** ..... 476

一、紧固件热处理 ..... 476

二、滚动轴承零件热处理 ..... 479

（一）滚动轴承的结构、服役条件和失效形式 ..... 479

（二）轴承材料的基本要求 ..... 479

（三）滚动轴承零件热处理的特点 ..... 479

（四）相关标准 ..... 480

（五）滚动轴承钢的常规热处理 ..... 480

（六）轴承零件的表面热处理 ..... 485

**第七节 铍青铜弹性件热处理** ..... 485

一、固溶处理 ..... 485

二、时效(脱溶)处理 ..... 486

## 第八章 热处理件的质量检测及评定分析 ..... 487

第一节 常用力学性能试验 ..... 487	九、碳化物级别评定 ..... 532
一、力学性能试验的取样及制作 ..... 487	十、化学热处理件铁素体评定 ..... 534
二、金属拉伸试验 ..... 487	十一、化学热处理渗层深度金相测定 ..... 535
三、金属弯曲试验 ..... 492	十二、渗金属层检验 ..... 536
四、金属冲击试验 ..... 495	十三、过热、过烧组织评定(工具钢、铝 合金) ..... 536
五、其他力学性能试验 ..... 496	十四、有效硬化层及硬化层深度的测定 ..... 537
第二节 硬度试验 ..... 504	第五节 金属材料化学分析方法 ..... 538
一、金属布氏硬度试验 ..... 504	一、取样方法与规定 ..... 539
二、金属洛氏及表面洛氏硬度试验 ..... 505	二、常用化学分析方法 ..... 539
三、金属维氏硬度试验 ..... 507	三、微区成分分析方法 ..... 541
四、金属肖氏硬度试验 ..... 509	四、化学分析的允许偏差 ..... 541
五、金属里氏硬度试验 ..... 510	第六节 钢的火花鉴别 ..... 545
六、其他硬度试验(努氏、韦氏) ..... 511	一、火花鉴别的原理 ..... 546
七、各种硬度值之间的换算及硬度与强度的 换算 ..... 512	二、火花鉴别的设备和方法 ..... 546
八、钢铁热处理件的硬度检验通则 ..... 512	三、火花的形状和鉴别 ..... 546
第三节 无损探伤 ..... 513	四、碳及合金元素对火花特征的影响 ..... 548
一、磁粉探伤 ..... 513	五、常用钢火花图谱 ..... 550
二、超声波探伤 ..... 515	第七节 热处理件相关失效分析方法 ..... 551
三、渗透探伤 ..... 516	一、失效和失效类型 ..... 551
第四节 金相分析与评定 ..... 517	二、失效分析基本思路 ..... 552
一、取样与制作 ..... 517	三、失效分析基本程序 ..... 553
二、非金属夹杂物含量测定 ..... 520	四、热处理件常见缺陷及对失效行为的一般 影响 ..... 554
三、金属材料晶粒度评定 ..... 522	五、裂纹的基本分析 ..... 555
四、带状组织(偏析)评定 ..... 523	六、宏观断口的基本识别 ..... 557
五、魏氏组织评定 ..... 524	七、微观断口的基本识别 ..... 560
六、球粒状珠光体(球化体)评定 ..... 525	八、热处理件的畸变及基本测量 ..... 561
七、马氏体组织评定 ..... 527	
八、残留奥氏体含量评定 ..... 531	

## 第九章 热处理通用设备 ..... 563

第一节 加热设备 ..... 563	第二节 冷却设备 ..... 589
一、电阻炉设备编号 ..... 563	一、淬火槽 ..... 589
二、电阻炉的主要类型 ..... 563	(一) 淬火冷却水槽 ..... 589
(一) 箱式电阻炉 ..... 563	(二) 淬火冷却油槽 ..... 590
(二) 井式电阻炉 ..... 565	(三) 淬火冷却浴槽 ..... 591
(三) 台车式电阻炉 ..... 568	(四) 淬火槽的主要附加装置 ..... 592
(四) 井式渗碳炉 ..... 569	二、喷雾冷却和喷液冷却装置 ..... 593
(五) 盐浴炉 ..... 571	三、循环冷却系统 ..... 593
(六) 流态粒子炉 ..... 577	(一) 循环冷却系统的类型 ..... 593
三、燃料炉 ..... 579	(二) 循环冷却系统的组成 ..... 594

四、冷处理设备 ..... 599

第三节 辅助设施 ..... 601

一、工装夹具 ..... 601

    (一) 工装夹具的设计原则 ..... 601

    (二) 常用的工装夹具 ..... 601

二、起重运输机械 ..... 605

三、喷砂机 ..... 605

第四节 热工仪表 ..... 605

一、传感器(温度测量元件)与温度计 ..... 606

二、温度显示与调节仪表 ..... 615

三、温度控制系统的应用 ..... 622

四、热处理炉内的气氛控制系统 ..... 624

五、流量计 ..... 626

六、压力测量仪表 ..... 627

第五节 筑炉材料 ..... 628

一、耐火材料 ..... 628

二、保温材料 ..... 636

三、耐热构件用金属材料 ..... 638

四、电热材料与电热元件 ..... 639

**第十章 热处理安全、卫生、环保要求及节能** ..... 650

第一节 热处理生产的安全、卫生要求 ..... 650

一、热处理生产常见的危险因素 ..... 650

二、热处理生产常见的有害因素 ..... 650

三、热处理生产厂房的建设要求 ..... 651

四、热处理作业环境的主要要求 ..... 651

第二节 热处理设备的安全、卫生要求 ..... 653

一、电阻炉的安全、卫生要求 ..... 653

二、燃油、燃气炉的安全、卫生要求 ..... 653

三、感应加热装置的安全、卫生要求 ..... 653

四、真空热处理设备的安全、卫生要求 ..... 653

五、气氛炉的安全、卫生要求 ..... 653

六、淬火、回火油槽的安全、卫生要求 ..... 654

第三节 热处理工艺作业的安全、卫生要求 ..... 654

一、整体热处理 ..... 654

二、表面热处理 ..... 654

三、化学热处理 ..... 655

四、真空热处理 ..... 655

第四节 热处理安全、卫生防护技术措施及管理措施 ..... 655

一、“四防” ..... 656

二、消防 ..... 656

三、爆炸的产生及防护 ..... 659

四、热处理生产安全监督 ..... 659

五、热处理生产的安全、卫生管理措施 ..... 660

第五节 热处理的环境保护技术要求及环保治理 ..... 660

一、热处理环境污染的分类和来源 ..... 660

二、废气治理与排放 ..... 661

三、废水治理与排放 ..... 662

四、固体废物及其无害化处理 ..... 663

五、噪声及其防治 ..... 665

第六节 节能、清洁生产及热处理的能耗 ..... 665

一、节能 ..... 665

二、清洁生产与循环经济 ..... 665

三、绿色热处理 ..... 666

四、热处理的节能途径 ..... 667

五、热处理的工艺电耗定额与综合工艺电耗定额的计算 ..... 667

六、热处理的工艺燃料消耗定额与综合工艺燃料消耗定额的计算 ..... 669

七、热处理加工万元产值能耗的统计计算 ..... 669

八、热处理炉用电可比单耗分等 ..... 670

**新技术展望** ..... 673

展望一 用于超高强度钢的淬火-碳分配-回火(沉淀)(Q-P-T)工艺 ..... 徐祖耀 673

一、Q-P工艺和Q-P-T工艺 ..... 673

二、Q-P-T钢的显微组织、性能、成分和

热处理设计 ..... 673

三、Q-P-T工艺的典型应用 ..... 674

展望二 计算机模拟在热处理中的应用 ..... 潘健生 顾剑锋 675

一、导言 ..... 675

二、回顾 .....	675	四、计算机模拟在热处理上应用的前景 .....	695
三、热处理计算机模拟的应用实例 .....	676		
<b>附 录</b> .....			698
附录一 常用材料力学性能的名称及 符号(新旧标准对照) .....	698	二、变形铝及铝合金的中外牌号对照 .....	727
附录二 热处理专业名词解释 .....	699	三、铜合金的中外牌号对照 .....	728
一、总类 .....	699	四、镁合金的中外牌号对照 .....	729
二、退火、正火类 .....	701	五、钛合金的中外牌号对照 .....	729
三、淬火类 .....	702	附录七 洛氏、表面洛氏、肖氏与布氏、 维氏硬度换算对照 .....	730
四、回火类 .....	704	一、洛氏硬度 HRC 与其他硬度的换算 对照 .....	730
五、固溶热处理类 .....	705	二、黑色金属各种硬度之间的换算 .....	731
六、渗碳类 .....	705	三、肖氏硬度与洛氏、布氏、维氏硬度的 换算 .....	733
七、渗氮类 .....	706	附录八 调质、轴类、套类及不同钢材套 类零件热处理时需预留的加工 余量 .....	734
八、渗其他非金属类及渗金属类 .....	707	一、调质件的加工余量 .....	734
九、共渗类 .....	707	二、轴类零件热处理时外圆预留的磨削 余量 .....	735
十、表面处理及复合热处理类 .....	708	三、套类零件热处理时预留的磨削余量 .....	735
十一、沉积类 .....	708	四、不同钢材套类零件的预留余量 .....	736
十二、组织类 .....	709	附录九 常用钢材水、油、分级、等温淬火 及按表面至半马氏体组织深度 所确定的临界淬火直径 .....	737
十三、热处理缺陷类 .....	711	一、常用钢材淬火后表面硬度 HRC 与截面 厚度或直径的关系 .....	737
十四、热处理设备类 .....	712	二、常用钢材在不同介质中淬火及分级淬火 时的临界尺寸 .....	738
附录三 标准代号及常用计量单位 .....	713	三、常用钢材等温淬火的最高硬度和最大有 效厚度 .....	738
一、标准代号 .....	713	四、按表面至半马氏体组织的深度作为淬透 性的判断标准的淬火临界直径 .....	738
二、部分国家标准代号 .....	714	附录十 钢的热处理工艺经验公式 .....	740
三、热处理常用计量单位 .....	714	一、热处理相变点的计算 .....	740
四、十进倍数和分数单位的词头 .....	714	二、钢的临界冷却速度的计算 .....	741
附录四 常用结构钢、工模具钢、不锈钢 耐热钢和铸铁的化学成分及中外 牌号对照 .....	715	三、钢预冷淬火时空气预冷时间 $t_1$ (s) 和 Ms 点以上分级冷却时间 $t_2$ (s) 的计算 .....	741
一、常用结构钢的化学成分和中外钢号 对照 .....	715	四、钢的淬火硬度计算 .....	741
二、常用工模具钢的化学成分和中外钢号 对照 .....	719	五、钢回火后的硬度计算 .....	742
三、常用不锈钢、耐热钢的化学成分和中 外钢号对照 .....	721		
四、常用铸铁的化学成分和中外牌号对照 .....	722		
附录五 不锈钢、耐热钢新旧牌号对照 .....	724		
附录六 铸造形变铝、铜、钛、镁合金中 外牌号对照 .....	726		
一、铸造铝合金的中外牌号对照 .....	726		

# 金属材料及热处理基础

## 第一节 钢的热处理基础知识

### 一、铁碳合金状态图

由铁与碳两种组元组成的碳钢和铸铁属于铁碳合金,是应用最为广泛的金属材料。铁碳合金相图是研究铁-碳合金系的化学成分、温度与组织结构之间关系的重要工具,是钢铁材料制定热加工工艺的重要依据。

铁碳合金状态图如图 1-1 所示。本相图及表 1-1、表 1-3 为区分组织符号与相图中英文字符,将组织奥氏体、铁素体、珠光体分别标成  $A(\gamma)$ 、 $F(\alpha)$ 、 $P(\alpha+Fe_3C)$ ,但其他表及文内组织符号仍标为 A、F、P。

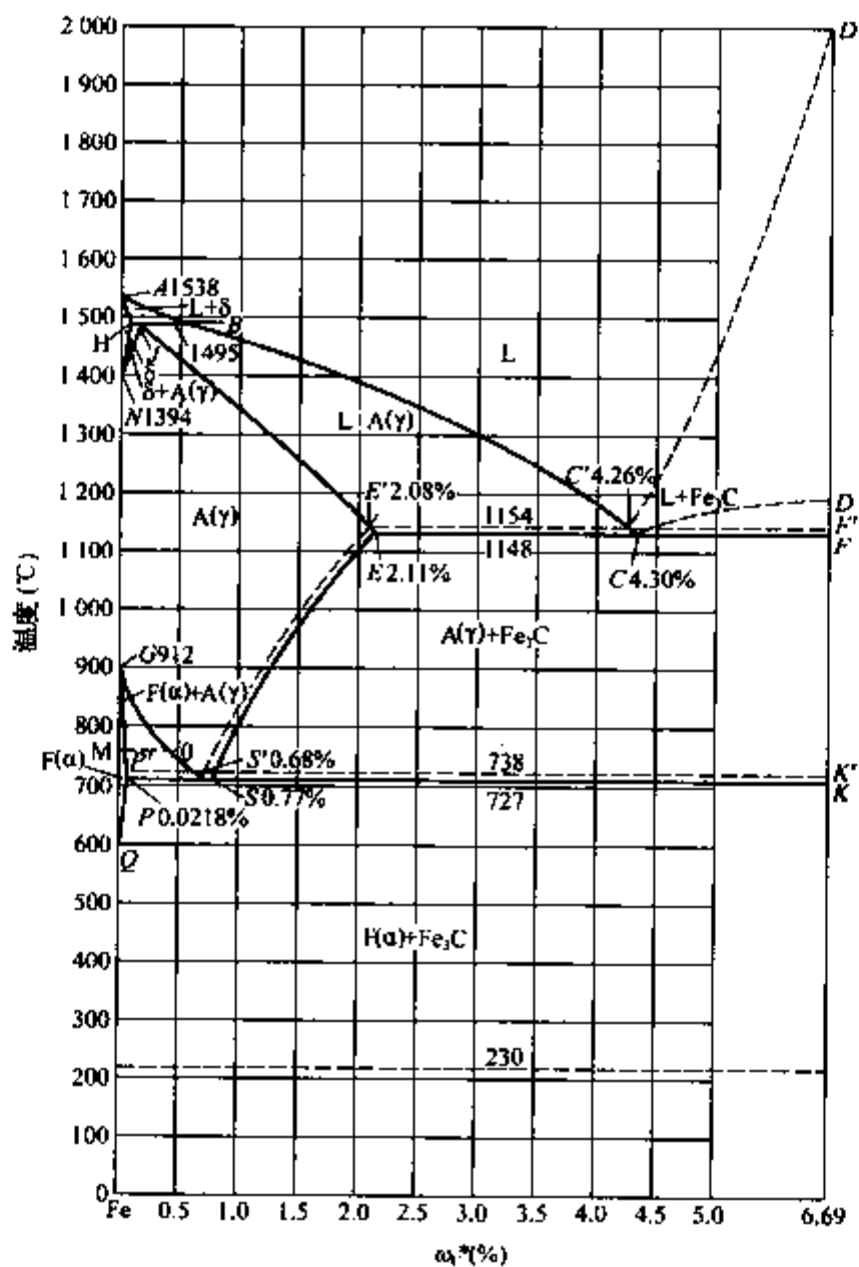


图 1-1 Fe-Fe<sub>3</sub>C(实线)及 Fe-C(虚线)合金状态图

\* 相图中  $\omega$  为质量分数,  $\omega_c$  即碳的质量分数,下同。

### (一) Fe-Fe<sub>3</sub>C及Fe-C合金状态图的结构

Fe-Fe<sub>3</sub>C及Fe-C合金状态图以碳的质量分数为横坐标,以温度为纵坐标。整个Fe-Fe<sub>3</sub>C合金状态图自液相至室温,包括包晶转变、共晶转变及共析转变三个部分(表1-1)。

表1-1 Fe-Fe<sub>3</sub>C合金状态图中出现的三个转变

转变名称	转变温度(°C)	转变方程式
包晶转变	1495	$L + \delta \xrightleftharpoons{1495^{\circ}\text{C}} A(\gamma)$
共晶转变	1148	$L \xrightleftharpoons{1148^{\circ}\text{C}} A(\gamma) + \text{Fe}_3\text{C}$
共析转变	727	$A(\gamma) \xrightleftharpoons{727^{\circ}\text{C}} F(\alpha) + \text{Fe}_3\text{C}$

### (二) Fe-Fe<sub>3</sub>C及Fe-C合金状态图中重要的点和线

#### 1. Fe-Fe<sub>3</sub>C及Fe-C合金状态图中重要的点

Fe-Fe<sub>3</sub>C及Fe-C合金状态图中的点均对应特定的温度和碳的质量分数,表示各点的字母为通用符号,不可随意更改。相图中J、C、S三点最为重要,表1-2、表1-3对各点进行了说明。

表1-2 Fe-Fe<sub>3</sub>C及Fe-C合金状态图中的点

符号	温度(°C)	w <sub>C</sub> (%)	含义
A	1538	0.0000	纯铁的熔点
B	1495	0.53	包晶线的端点,包晶转变时液相的成分
C	1148	4.30	共晶点(Fe-Fe <sub>3</sub> C系)
C'	1154	4.26	共晶点(Fe-C系)
D	1227	6.69	渗碳体的熔点
E	1148	2.11	碳在γ-Fe中的最大溶解度(Fe-Fe <sub>3</sub> C系)
E'	1154	2.08	碳在γ-Fe中的最大溶解度(Fe-C系)
F	1148	6.69	共晶线的端点(Fe-Fe <sub>3</sub> C系)
F'	1154	6.69	共晶线的端点(Fe-C系)
G	912	0.0000	α-Fe↔γ-Fe同素异构转变点
H	1495	0.09	δ-Fe中碳原子最大溶解度,包晶线的端点
J	1495	0.17	包晶转变点
K	727	6.69	共析线的端点(Fe-Fe <sub>3</sub> C系)
K'	738	6.69	共析线的端点(Fe-C系)
M	770	0.0000	α-Fe的磁性转变点(Fe-Fe <sub>3</sub> C系)
N	1394	0.0000	δ-Fe↔γ-Fe同素异构转变点
O	770		α-Fe的磁性转变点(Fe-Fe <sub>3</sub> C系)
P	727	0.0218	碳在α-Fe中的最大溶解度(Fe-Fe <sub>3</sub> C系)
P'	738	0.02	碳在α-Fe中的最大溶解度(Fe-C系)
Q	室温	0.008	室温下α-Fe中碳的溶解度
S	727	0.77	Fe-Fe <sub>3</sub> C系中的共析点
S'	738	0.68	Fe-C系中的共析点

表 1-3 Fe-Fe<sub>3</sub>C 合金状态图中的 J、C、S 三点

符号	温度(°C)	w <sub>C</sub> (%)	含 义 说 明
J	1 495	0.17	包晶转变点: 含碳量在 H 点与 B 点之间的铁碳合金溶液缓慢冷却至 1 495°C 时, B 点成分的液相(L <sub>B</sub> )与 H 点成分的固相(δ <sub>H</sub> )发生包晶转变, 生成 J 点成分的奥氏体(A <sub>J</sub> ) 包晶转变在恒温下进行, 转变过程中 L、δ、A(γ)三相共存, 方程式为 $L_B + \delta_H \xrightarrow{1495^\circ\text{C}} A(\gamma)_J$
C	1 148	4.30	Fe-Fe <sub>3</sub> C 系共晶点: w <sub>C</sub> % > 2.11% 的铁碳合金溶液缓慢冷却至 1 148°C 时, C 点成分的液相 L <sub>C</sub> 发生共晶转变生成 E 点成分的奥氏体 A(γ) <sub>E</sub> 和 F 点成分的渗碳体 Fe <sub>3</sub> C。共晶转变在恒温下进行, 转变过程中 L、A(γ)、Fe <sub>3</sub> C 三相共存, 方程式为 $L_C \xrightarrow{1148^\circ\text{C}} A(\gamma)_E + \text{Fe}_3\text{C}$ 共晶转变的产物是奥氏体与渗碳体(共晶渗碳体)形成的混合物, 称为莱氏体, 用符合 L <sub>d</sub> 表示, 因此共晶转变也可以表示为: $L_C \xrightarrow{1148^\circ\text{C}} L_d$
S	727	0.77	Fe-Fe <sub>3</sub> C 系中的共析点: 在冷却过程中含碳量凡落在 P 点与 E 点之间的铁碳合金缓慢冷却至 727°C 时发生共析转变, S 点成分的奥氏体 A(γ) <sub>S</sub> 转变为 P 点成分的铁素体 F(α) <sub>P</sub> 和渗碳体 Fe <sub>3</sub> C。共析转变在恒温下进行, 转变过程中 A(γ)、F(α)、Fe <sub>3</sub> C 三相共存, 方程式为 $A(\gamma)_S \xrightarrow{727^\circ\text{C}} F(\alpha)_P + \text{Fe}_3\text{C}$ 共析转变的产物为铁素体与渗碳体形成的机械混合物, 称为珠光体, 以符号 P(α+Fe <sub>3</sub> C) 表示。利用高倍显微镜观察发现珠光体中铁素体与渗碳体相间分布, 呈层片状。珠光体的强度较高, 硬度、塑性、韧性介于铁素体与渗碳体之间, 综合力学性能较好

2. Fe-Fe<sub>3</sub>C 及 Fe-C 合金状态图中重要的特性线

Fe-Fe<sub>3</sub>C 及 Fe-C 合金状态图中重要的特性线, 见表 1-4。

表 1-4 Fe-Fe<sub>3</sub>C 及 Fe-C 合金状态图中重要的特性线

特性线	说 明
AB	δ 相的液相线
BC	Λ 相的液相线
CD	Fe-Fe <sub>3</sub> C 合金液相中 Fe <sub>3</sub> C 的析出开始线
CD'	Fe-C 合金液相中石墨的析出开始线
AH	δ 相的固相线
JE	A 相的固相线(Fe-Fe <sub>3</sub> C 系)
JE'	A 相的固相线(Fe-C 系)
HN	缓慢冷却时为 δ→A 转变开始温度线 缓慢加热时为 A→δ 转变终了温度线
JN	缓慢冷却时为 δ→A 转变终了温度线(A <sub>1</sub> ) 缓慢加热时为 A→δ 转变开始温度线
GS	缓慢冷却时为 A→F 转变开始温度线(A <sub>3</sub> ) 缓慢加热时为 F→A 转变终了温度线
GS'	缓慢冷却时为 A→F 转变开始温度线(Fe-C 系)
GP	缓慢冷却时为 A→F 转变终了温度线 缓慢加热时为 F→A 转变开始温度线



(续表)

特性线	说 明
ES	缓慢冷却时为 $A \rightarrow Fe_3C$ 转变开始温度线 ( $A_{cm}$ )
$E'S'$	缓慢冷却时为 $A \rightarrow G$ 转变开始温度线 (Fe-C 系)
PQ	碳在 F 中的溶解度线
$P'Q'$	碳在 F 中的溶解度线 (Fe-C 系)
MO	F 的磁性转变线 ( $A_2$ )
HJB	$L_B + \delta_H \leftrightarrow A_1$ 包晶转变线
ECF	$L_C \leftrightarrow A_E + Fe_3C$ 共晶转变线
$E'C'F'$	$L_C \leftrightarrow A_E + G$ 共晶转变线 (Fe-C 系)
PSK	$A_S \leftrightarrow F_P + Fe_3C$ 共析转变线 ( $A_1$ )
$P'S'K'$	$A_S \leftrightarrow F_P + G$ 共析转变线 (Fe-C 系)
230°C 线	$Fe_3C$ 的磁性转变线 ( $A_0$ )

3. Fe-Fe<sub>3</sub>C 及 Fe-C 合金状态图相区中的代号与组织特征Fe-Fe<sub>3</sub>C 及 Fe-C 合金状态图相区中的代号与组织特征见表 1-5。表 1-5 Fe-Fe<sub>3</sub>C 及 Fe-C 合金状态图相区中的代号与组织特征

代 号	相的名称	分 类	结 构 特 征
F	铁素体	单相组织	也常用 $\alpha$ 为代号, 是碳在 $\alpha$ -Fe 中的间隙固溶体, 体心立方结构。其力学性能与工业纯铁大致相当, 强度、硬度低, 塑性好
A	奥氏体	单相组织	也常用 $\gamma$ 为代号, 是碳在 $\gamma$ -Fe 中的间隙固溶体, 面心立方结构。奥氏体的强度较低, 硬度不高, 易于塑性变形, 无磁性
$\delta$	$\delta$ 铁素体	单相组织	是碳在 $\delta$ -Fe 中的间隙固溶体, 体心立方结构
$Fe_3C$	渗碳体	单相组织	是以分子式 $Fe_3C$ 表述的金属化合物, 为正交晶系的复杂结构。在铁碳合金系中由于生成条件的不同, 渗碳体有条状、网状、片状、粒状等形态, 对力学性能影响显著。其性能极硬且脆
P	珠光体	两相组织	$w_C 0.77\%$ 的奥氏体在 727°C 共析转变的产物。由铁素体和渗碳体以薄层片交替重叠而成的层状复相物 (机械混合物), 其强度、硬度与层片的粗细相关
$L_d$	莱氏体	两相组织	$w_C 4.3\%$ 的熔融液体在 1148°C 共晶转变的产物, 是奥氏体与渗碳体的机械混合物
G	石 墨	—	游离的碳晶体, 具有密排六方结构
L	液 相	—	铁碳合金的熔融液体

## 二、金属材料的性能与材料的选择

制造机械零件的金属材料, 基本以冶金企业的产品为主。选择并应用每种金属材料, 是因为该材料具有所期望的性能, 能在规定工况条件下可靠地运行。

## 1. 金属材料的性能

金属材料的性能, 包括材料的物理性能、化学性能、力学性能, 工艺性能以及使用性能等, 主要内容见表 1-6。

表 1-6 金属材料的性能及其主要内容

性能类别	主要内容
物理性能	指材料所具备的物理特征,包括:熔点、密度、比热、热导率、线膨胀系数、电导率、磁导率等,是每一种金属材料所具备的本质特征
化学性能	指材料在各种温度、湿度、介质环境条件下的抗氧化、耐腐蚀等能力,主要取决于材料的化学成分及其热处理后的显微组织
力学性能	指材料所具备的弹性模量、强度(抗拉、抗压、抗弯、抗剪切、抗扭转、屈服、持久、疲劳等强度)、硬度、塑性(断后伸长率、断面收缩率、冲击吸收功、断裂韧性等)等。金属材料的力学性能取决于材料的化学成分,更取决于材料的热处理工艺过程
工艺性能	指材料制造成为某一零件时的可加工性能。选择的材料既具有零件所要求的潜在组织与性能,又具备良好的加工工艺性能,是机械制造工作者的不懈追求 金属材料的工艺性能包括:铸造(砂型铸造、离心铸造、压力铸造、熔模铸造、真空铸造等)工艺性能、压力加工(锻压、冲压、挤压、轧制、拉拔等)工艺性能、切削加工(车、铣、刨、磨、镗、钻、拉、铰、插、锯、钳、铨等)工艺性能、热处理工艺性能(淬透性、淬硬性、过热及过烧敏感性、回火脆性等)、焊接性能等
使用性能	指用某种材料制造的零件,具备所要求的功能,胜任工况下长期可靠工作的能力。具体零件的使用可靠性,不仅取决于所选材料及热处理赋予的性能,还取决于零件的结构形式、工况条件等

## 2. 生产现场的力学性能试验

金属材料的力学性能试验,一般在专门的试验室内完成。现场硬度检验是应用最广泛的力学性能试验手段,硬度是热处理工作者在生产实践中,可以直接控制的力学性能指标。因硬度计的压头、载荷的不同,硬度试验有多种方法和标尺,以满足不同材料本体及改性层的硬度测试。常用的硬度试验方法及适用范围见表 1-7。

表 1-7 硬度试验方法及适用范围

硬度试验方法	适用范围	试验结果表示
布氏硬度试验	以硬质合金压头,适用于金属材料 650 HB 以下硬度值的零件	HBW
洛氏硬度试验	有多种压头和标尺,适用范围宽广	HR(不同压头和标尺,标尺共 15 种)
维氏硬度试验	用于测量小件、薄件及有浅或中等厚度硬化层零件的表面硬度	5~1 000 HV 试验力范围 49.03~980.70N
努氏硬度试验	试验力一般不超过 9.80 N,主要用于测量微小件、极薄件、极硬件表面或显微组织的硬度	HK (N/mm <sup>2</sup> )
肖氏硬度试验	主要用于大件的现场硬度测量	HS
里氏硬度试验	用于大件、组装件、形状较复杂零件的现场硬度测量	HL
超声硬度试验	用于大件、组装件、形状较复杂零件、渗氮件等的现场硬度测量	按仪器设定
锤击布氏硬度试验	用于正火、退火、调质件及原材料的现场硬度测量	HB
钢的锉刀硬度试验	用于形状较复杂件、大件等的现场硬度测量,一般零件硬度为 40 HRC	通过用不同硬度(HRC)的锉刀锉待检部位,以手感进行比较
硬度的无损检测	用于成批大量制造零件,如发动机连杆体、重要紧固件的 100% 硬度现场检查	对批量零件的硬度均匀性检查与监控

### 3. 金属材料的选择

机械装备的制造需选择多种金属材料,采用多种加工工艺方法。选择合适材料的一般原则见表 1-8。

表 1-8 材料选择遵循的一般原则

材料选择的原则	具体要求
可靠性	从零件的服役工况需求出发选择材料,经过一系列加工最大限度地满足零件的各种性能要求,使其在工况条件下长期可靠运行
工艺性	做到优良的材料性能与良好加工性能统一。确保材料加工过程顺畅、成品率高、生产效率高、制造成本低
经济性	机械装备的制造成本中,材料的成本占有较高的比重,在确保可靠性的前提下,关注材料的采购成本及货源供给的相对稳定 对于大批量重复制造的零部件,尽可能采用成本相对较低的材料,通过有效地加工(尤其是恰当的热处理)稳定地进行生产 用于制造加工工具类产品,其使用寿命是大批量高效率生产的保证,应选择较好的材料制造 选择特殊机械装备的核心零部件材料时,可靠性必须置于首位

### 4. 制造机械零件用金属毛坯的来源

制造机械零件用金属毛坯的来源,主要为五大类,见表 1-9。

表 1-9 制造机械零件用金属毛坯的来源

毛坯类型	毛坯来源与用途
型材	型材是冶金工厂的产品,是机械零件制造使用最广泛的毛坯材料。以钢产品为例,冶炼后的钢水经过铸坯—开坯—锻、轧后,成为各种规格的圆钢、方钢、异型钢、板材、线材、管材、块状坯料等 国家根据各种行业与产品的需求,制订有若干专用型材的技术标准。在进行机械零件设计时,可参照冶金产品目录选择相应牌号与规格的型材。较大批量特殊规格的型材需求,可通过向冶金工厂特殊订货予以满足
锻压制坯	机械零件锻坯的原材料以型材为主(大锻件用钢锭锻成)。采用锻压方法制坯,不仅可以获得零件特定的结构,更可满足对金属流线的特殊要求,具有较高的结构强度
铸造制坯	铸造工艺的最大特点是,通过对铸型的设计和铸造方法的选择,铸造出结构形状复杂的零件,制造成本也较低。采用铸造方法可获得形状各异的零件毛坯。可铸造的材料包括铸铁、铸钢、有色金属、特种合金等
焊接制坯	将按技术要求下料的金属型材或已进行机械粗加工的部件,用焊接方法拼接成一个零件。通过焊接方法,可完成结构复杂零件的制造,如万吨水压机机架、万匹马力低速柴油机机体、加工中心机床的床身等大型薄壁构件。也可用以批量制造各种结构较复杂的薄壳类零件,如轿车车身、各种箱体等
粉末冶金坯	粉末冶金坯为粉末冶金专业工厂的产品。按照零件的使用性能要求,选择不同的金属粉末与添加剂混合,再经挤(锻)压成型、在保护气氛中烧结,成为具有特定性能的机械零件毛坯

### 5. 钢质结构零件一般的工艺路线

金属零件的制造需通过若干道工序才能完成,热处理工序一般处于全部制造工序过程的某一或某几个中间环节。较好的安排机加工—热处理的工序衔接,对于保证零件加工质量和提高加工效率,都是有利的。以钢铁材料为例,一般结构零件的工艺路线(不包括原材料及毛坯的预备热处理)见表 1-10。

表 1-10 钢质结构零件一般的工艺路线

毛坯类型	热处理目的	一般工序编排
型 材	获得综合力学性能	下料→调质处理→机械加工→成品
		下料→机械粗加工→调质处理→机械精加工→成品
	满足低、中碳的结构钢、高碳的工具钢及轴承钢零件的中、高硬度要求	下料→(预备热处理)→淬火→回火→机械加工→成品
		下料→(预备热处理)→机械粗加工→淬火→回火→机械精加工→成品
	满足零件表面或局部的高硬度、耐磨性能等特殊要求	中、高碳钢：下料→(预备热处理)→机械粗加工→表面淬火(感应淬火、火焰淬火、激光淬火等)→机械精加工→成品,或对其成品进行渗氮、氮碳共渗处理
		渗碳钢：机械粗加工→化学热处理(渗碳、碳氮共渗、多元共渗等)→(去除零件上不需改性部位的渗层)→淬火(含局部)、回火处理→机械精加工→成品
	零件获得弹性	用已淬火—回火态材料制造弹簧：盘制成型→低温去应力→表面抛丸强化→校正→低温去应力→机械加工→弹簧性能试验→表面防锈处理→成品
		用退火态材料制造弹簧：盘制成型→再结晶退火→校正→淬火、回火处理→抛丸强化→校正→低温去应力→机械加工→性能试验→表面防锈处理→成品
		片(板)状弹簧：冲剪落料成型→单片(或装夹具)淬火、定型回火→表面防锈处理→成品
	锻压制坯	(同型材)
铸造制坯	消除铸件内应力,消除白口组织	铸件去应力退火、去白口退火→机械加工→成品
	提高铸件强度和塑性	铸件正火→机械加工→成品
	提高零件强度	铸坯→预备热处理→机械粗加工→淬火、回火(含等温淬火、表面淬火、或化学热处理等)→机械精加工→成品
焊管制坯	消除焊接应力和焊缝处的组织缺陷,稳定尺寸,满足局部性能要求	一般零件：焊接构件→去应力处理→机械加工→成品
		局部有硬度要求的零件：焊接构件→去应力处理→机械加工→局部热处理→机械加工→成品
粉末冶金坯	满足零件性能	粉末冶金坯→机械加工→热处理→机械加工→成品

### 三、钢的热处理原理

#### (一) 钢在加热过程中的组织转变

钢在加热过程中的组织转变见表 1-11。

表 1-11 钢在实际加热过程中的组织转变

钢的类型	钢在加热过程中的组织转变
亚共析钢	室温为铁素体+珠光体组织,加热至 $A_{c1}$ ,珠光体开始转变成奥氏体;加热 $A_{c1} \sim A_{c3}$ 区间,为铁素体+奥氏体;加热至 $A_{c3}$ 以上的单相区内为奥氏体
共析钢	室温为珠光体组织,加热至 $A_{c1}$ 以上的单相区内,珠光体向奥氏体转变,即 $F+Fe_3C \rightarrow A$
过共析钢	室温为珠光体+渗碳体组织,加热至 $A_{c1}$ ,珠光体开始转变成奥氏体;加热至 $A_{c1} \sim A_{cm}$ 区间,为渗碳体+奥氏体;加热至 $A_{cm}$ 以上的单相区内为奥氏体

## (二) 钢的过冷奥氏体转变

钢在冷却过程的组织转变,因奥氏体过冷度的不同,过冷奥氏体的转变方式、转变产物的组织和性能也不相同。

### 1. 共析钢过冷奥氏体转变特征(表 1-12)

表 1-12 共析钢过冷奥氏体转变特征

钢在冷却过程中的组织转变	转变温度范围( $^{\circ}C$ )	转变类型	转变组织与特征
过冷奥氏体的高温分解	$550^{\circ}C$ 以上	珠光体型转变	<p>获得铁素体与渗碳体层片相间珠光体组织。珠光体的片间距随着过冷奥氏体分解的温度降低而逐渐减小,分别得到珠光体及片间距较小的索氏体和片间距极细小的托氏体。如果加热时奥氏体温度较低,随后冷却时过冷度又较小(或等温温度较高、或冷却速度慢)的情况下,可以获得在铁素体基体上均匀分布着球状(粒状)渗碳体的粒状珠光体</p> <p>片状珠光体的强度和硬度随珠光体片间距减小而升高。粒状珠光体的强度和硬度较片状珠光体低,而塑性和韧性较片状珠光体高。珠光体具有良好的切削性能</p>
过冷奥氏体的中温转变	$550^{\circ}C \sim$ 马氏体( $M_s$ ) 点之间	贝氏体型转变	<p>获得贝氏体型组织。由于钢的转变温度、钢的化学成分等因素的影响,组织形成的机制不同,贝氏体的形貌与珠光体类型的产物有很大差别,呈现出复杂的多样性</p> <p>上贝氏体:转变温度范围 <math>550 \sim 350^{\circ}C</math> 区间。上贝氏体形态特点是在贝氏体铁素体板条之间存在未转变的奥氏体或其转变产物。上贝氏体有多种形态,包括无碳贝氏体、粒状贝氏体、羽毛状上贝氏体等</p> <p>下贝氏体:转变温度范围 <math>350^{\circ}C \sim M_s</math> 区间。下贝氏体形态特点是碳化物位于贝氏体铁素体板条或片之内。下贝氏体形态有针状下贝氏体、柱状贝氏体等</p>
过冷奥氏体的低温转变	马氏体 点以下	马氏体型转变	<p>钢中马氏体转变按转变动力学特征可分为:变温马氏体转变、等温马氏体转变、爆发型马氏体转变和热弹性马氏体转变等。高碳片状马氏体是所有不稳定组织中最硬、脆的一种组织。马氏体的基本组织形态主要有:</p> <p>板条状马氏体:典型的低碳钢淬火组织,具有高强韧性能。组织特征是在马氏体条的内部存在高密度位错的亚结构,并存在条间奥氏体</p> <p>片状马氏体:片状马氏体的亚结构为孪晶。高碳马氏体呈片状(针状、透镜状),片间成一定角度。多数马氏体片有中脊。在马氏体的周围伴有残留奥氏体,马氏体片间会有微裂纹</p> <p>细针状马氏体和隐针马氏体:板条状或片状马氏体一般都不穿过原奥氏体晶界,随着淬火温度的降低,马氏体片更细。细小的奥氏体晶粒和未溶碳化物的存在,都能使高碳钢淬火时获得细马氏体,其组织在光学显微镜下无法分辨</p>

## 2. 共析钢的三种过冷奥氏体冷却转变方式的特征比较(表 1-13)

表 1-13 共析钢的三种过冷奥氏体冷却转变方式的特征比较

项 目	珠光体型转变	马氏体型转变	贝氏体型转变 <sup>②</sup>
形成温度范围	$A_1 \sim 550^\circ\text{C}$	$M_s \sim 80^\circ\text{C}$	$550^\circ\text{C} \sim M_s$
铁、碳与合金原子的扩散性	均有扩散	无扩散 <sup>①</sup>	碳原子扩散,铁及合金原子无扩散
形成组织	含碳极低的铁素体和渗碳体的两相组织	碳在 $\alpha$ Fe 相的过饱和单相组织	上贝氏体为过饱和度极低的 $\alpha$ 相与渗碳体;下贝氏体为过饱和度较高的 $\alpha$ 相与 $\epsilon$ 碳化物

注: ① 低碳钢中马氏体转变时,碳会有一定程度的扩散。

## 3. 奥氏体的稳定化

钢的过冷奥氏体低温转变时,会出现马氏体转变量减少、残留奥氏体增多的现象,即奥氏体的稳定化。引起这种现象发生源自两个方面的影响见表 1-14。

表 1-14 影响奥氏体稳定化的因素

影响类型	现 象
热稳定化	钢在淬火时的冷却中断并等温停留(在略高于 $M_s$ 点以上停留,可使 $M_s$ 点下降;在 $M_s$ 点以下停留,可使马氏体继续转变的温度降低),出现马氏体转变量减少、残留奥氏体增多的现象,称为奥氏体热稳定化 发生热稳定化的温度有一个上限,它主要取决于奥氏体的化学成分
机械稳定化	在 $M_d$ 点以上进行大形变量的塑性变形,可使马氏体转变量减少

## 4. 魏氏组织及其对钢性能的影响(表 1-15)

魏氏组织的评定按 GB/T13299—1991 钢的显微组织评定方法,分为两个系列六个等级。A 系列作为含  $w_c 0.15\% \sim 0.30\%$  钢的魏氏组织评级;B 系列作为  $w_c 0.31\% \sim 0.50\%$  钢的魏氏组织评级。其中 0~2 级魏氏组织比较轻微,对不太重要的零件仍可使用;3~5 级魏氏组织,对钢的性能危害较大,在钢中不允许存在。消除魏氏组织的方法有调质处理、完全退火、等温退火、二次正火等。

表 1-15 魏氏组织与对钢性能的影响

钢 的 类 型	产生条件与组织特征	对钢性能的影响
低于 $w_c 0.6\%$ 的亚共析碳钢或低合金钢	在奥氏体晶粒较粗或冷速适当的条件下,先共析铁素体呈片状或粗大羽毛状组织,与原奥氏体有一定位向关系	魏氏体对钢的抗拉强度的影响不大,但使钢的塑性与冲击韧性显著降低
过共析钢	在珠光体转变前析出的先共析渗碳体呈针状,出现在原奥氏体晶粒内部	

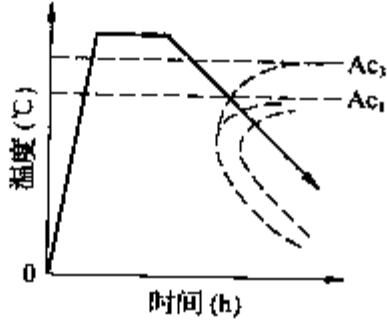
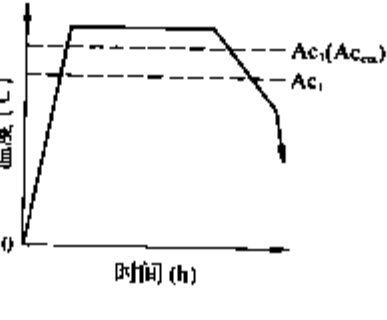
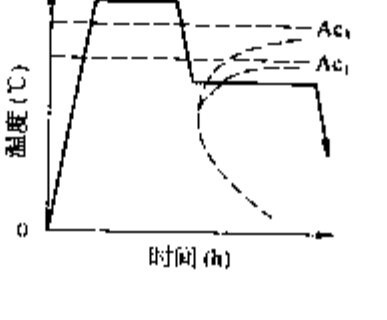
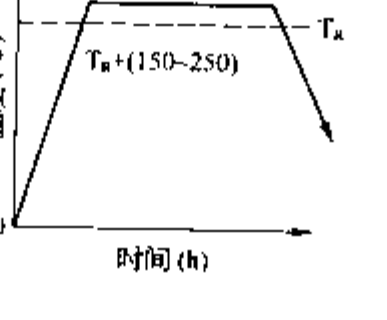
## 四、钢铁的常规热处理工艺

## (一) 钢铁零件的退火

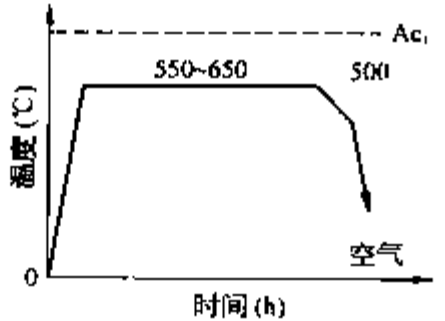
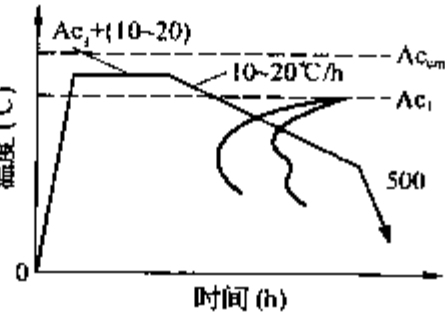
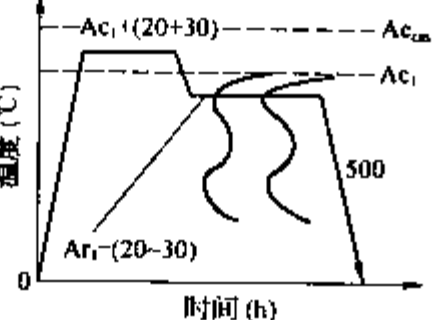
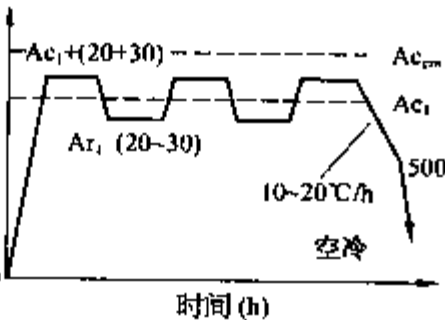
钢铁的退火,是将铸件、锻件或塑性加工后的零件,以细化和均匀组织、消除枝晶偏析和内应力、降低硬度为目的,加热到适当温度保持一定时间后,以不同的缓慢冷却方式冷却,以获得接近平衡状态组织的工艺方法。退火一般用于预备热处理,对于组织与性能要求不高的零件,退火也可作为零件的最终热处理。

根据钢铁制品的化学成分和坯料状态,常用的退火工艺方法有多种,见表1-16。各种钢铁零件的退火温度、升温速度与保温时间,必须依化学成分与零件结构的具体情况选择。以亚共析钢的含碳量为例,随着碳的质量分数增加,退火温度渐低,升温速度渐慢(或需要阶梯升温),保温时间渐长。以同种材料的零件结构为例,随着零件结构的复杂程度增加,升温速度渐慢(或需要阶梯升温)。

表1-16 钢铁零件常用的退火工艺方法

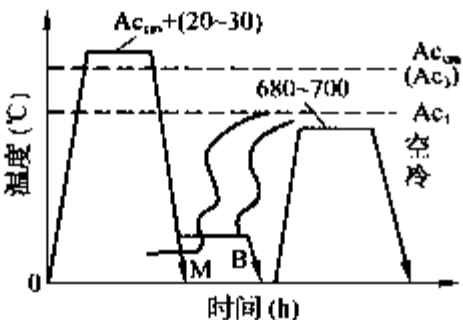
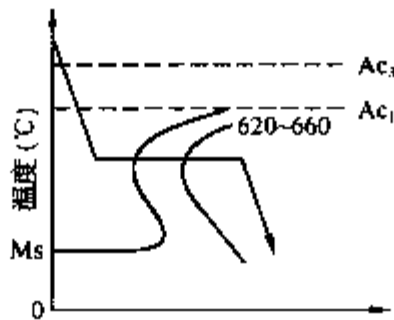
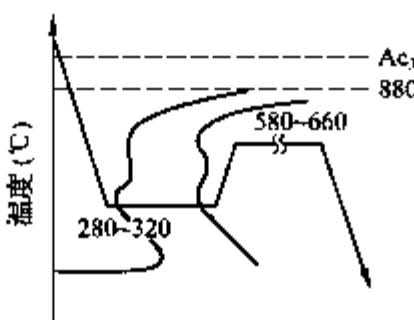
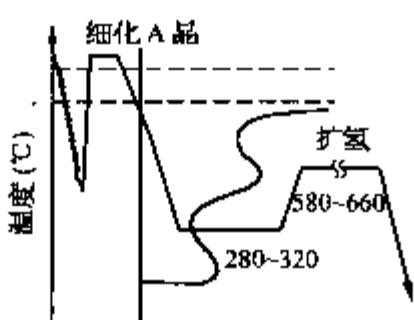
退火方法	工艺曲线	工艺参数	适用对象及组织性能变化
完全退火		加热温度： $A_{c3} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 升温速度： 碳钢： $100 \sim 150^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 低合金钢： $< 100^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 高合金钢： $< 80^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 保温时间： $1.5 \sim 2 \text{ min}/\text{mm}$ 出炉冷却： $< 300^{\circ}\text{C}$	用于亚共析钢铸、锻、焊接件 细化组织、均匀组织、消除魏氏组织、消除内应力、降低硬度、改善切削性能
均匀化退火		加热温度： $A_{c3}$ 或 $A_{cm}$ 线以上较高温度的单相区 升温速度： $100 \sim 150^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 保温时间：数小时~数十小时 冷却速度与完全退火相同 为了细化晶粒常需补充进行完全退火或正火	用于合金钢铸锭、铸件、锻件 均匀化学成分、消除或改善显微组织的偏析等缺陷
等温退火		加热温度： $A_{c3} + 30 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 等温温度：根据钢的化学成分与退火硬度要求决定 等温后一般出炉空冷，大截面零件应缓冷至 $500^{\circ}\text{C}$ 后空冷	用于亚共析钢铸、锻件退火。 细化组织、消除内应力、降低硬度、提高塑性
再结晶退火		加热温度： $600 \sim 700^{\circ}\text{C}$ 保温时间： $1 \sim 3 \text{ h}$ 冷却方式：空冷 对于 $\alpha_c < 0.2\%$ 的普碳钢，冷变形时若达到临界变形度 $6\% \sim 15\%$ ，再结晶退火后易出现粗晶 $T_R$ ：再结晶温度	用于经冷变形加工的钢质零件，使变形的晶粒重新结晶为较均匀的等轴晶粒

(续表)

退火方法	工艺曲线	工艺参数	适用对象及组织性能变化
去应力退火	 <p>温度(°C)</p> <p>时间(h)</p> <p>Ac<sub>1</sub></p> <p>550~650</p> <p>500</p> <p>空气</p>	加热温度： $<Ac_1$ 一般钢材 550~650℃ 合金工具钢 650~750℃ 加热速度：100~150℃/h 保温时间：3~5 min/mm 冷却速度：60~100℃/h, 300℃以下 出炉空冷	用于消除铸造、锻造、焊接、型材加工成型零件的残留应力
	 <p>温度(°C)</p> <p>时间(h)</p> <p>Ac<sub>1</sub>+(10~20)</p> <p>Ac<sub>cm</sub></p> <p>Ac<sub>1</sub></p> <p>10~20℃/h</p> <p>500</p> <p>缓慢冷却球化退火</p>	加热温度： $Ac_1 + 10 \sim 20^\circ C$ 保温时间：取决于零件透热时间(不宜过长) 冷却速度：一般以 10~20℃/h 速度冷却至 500℃以下空冷；碳钢的冷却速度为 20~40℃/h	用于共析钢、过共析钢的球化退火。球化周期长，球化较充分
球化退火	 <p>温度(°C)</p> <p>时间(h)</p> <p>Ac<sub>1</sub>+(20+30)</p> <p>Ac<sub>cm</sub></p> <p>Ac<sub>1</sub></p> <p>Ar<sub>1</sub>-(20~30)</p> <p>500</p> <p>等温球化退火</p>	加热温度： $Ac_1 + 20 \sim 30^\circ C$ 保温时间：取决于零件透热时间 等温温度： $Ar_1 - 20 \sim 30^\circ C$ 冷却速度：取决于具体材料的 TTT 曲线及零件截面尺寸。等温后空冷	用于过共析钢、合金工具钢的球化退火，退火周期较短，适宜于大件退火。球化较充分，易控制
	 <p>温度(°C)</p> <p>时间(h)</p> <p>Ac<sub>1</sub>+(20+30)</p> <p>Ac<sub>cm</sub></p> <p>Ac<sub>1</sub></p> <p>Ar<sub>1</sub> (20~30)</p> <p>10~20℃/h</p> <p>500</p> <p>空冷</p> <p>周期(循环)球化退火</p>	加热温度： $Ac_1 + 20 \sim 30^\circ C$ 保温时间：取决于零件均温时间 等温温度： $Ar_1 - 20 \sim 30^\circ C$ 循环周期：根据球化要求等级而定，以 10~20℃/h 缓冷至 550℃空冷	用于过共析钢、合金工具钢的球化退火，退火周期较短，球化较充分。但过程控制较繁，不宜于大件退火



(续表)

退火方法	工艺曲线	工艺参数	适用对象及组织性能变化
球化退火	 <p>快速球化退火</p>	<p>加热温度：<math>Ac_{cm}</math> (或 <math>Ac_3</math>) + 20~30℃                      冷却：淬油或等温淬火，获得马氏体或贝氏体组织                      高温回火：680~700℃, 1~2 h</p>	<p>用于共析钢、过共析碳钢及合金钢的锻件快速球化退火或淬火件的返修。因重淬前的预处理畸变较大，仅限用于小件</p>
预防白点退火	 <p>碳钢、低合金钢</p>	<p>钢在热形变加工(锻压)的冷却过程中，氢可能呈气态析出而形成发裂(白点)                      氢在 <math>\alpha</math>-Fe 中的扩散系数较在 <math>\gamma</math>-Fe 中大得多，而氢在 <math>\alpha</math>-Fe 中的溶解度较 <math>\gamma</math>-Fe 中低得多。大锻件进行预防白点退火，首先从奥氏体状态冷却到 C 曲线的“鼻尖”温度范围(过冷奥氏体最不稳定区域)尽快获得铁素体+碳化物组织，然后在该温度区或升高到稍低于 <math>Ac_1</math> 的温度长时间保温进行扩氢</p>	<p>用于碳钢、低合金钢、高合金钢的大型锻件的扩氢</p>
	 <p>中合金钢</p>		
	 <p>高合金钢</p>		

## (二) 钢铁零件的正火处理

钢铁零件的正火处理,即将钢或铸铁零件加热并奥氏体化后在空气中冷却的热处理工艺,得到含有珠光体的均匀组织。根据零件材料的化学成分与组织性能要求,正火的冷却,可以采取静止空气冷却、吹风冷却、喷雾冷却等方式。但必须控制冷却效果,不至于在零件的表面层出现贝氏体或马氏体组织。

### 1. 钢铁零件正火的目的

正火可细化晶粒、均匀组织、消除切削加工后的硬化现象,并去除内应力、改善低碳钢的切削性能、消除过共析钢中的网状碳化物。正火常作为钢的预备热处理,为零件最终热处理做组织准备。正火也可作为某些零件的最终热处理。

钢铁零件的化学成分及正火组织,决定了正火的效果。所有钢铁材料通过正火,均可以使铸锻零件晶粒细化,并消除内应力以及获得优于退火态的综合力学性能。 $w_c < 0.45\%$ 的中、低碳钢零件,常以正火替代完全退火,具有良好的技术经济效益。中、高碳钢及中、高碳合金钢零件,正火后可能具有稍高的硬度和内应力,需要补充进行加热至  $550 \sim 600^\circ\text{C}$  的低温退火。

### 2. 钢铁零件常用的正火工艺(表 1-17)

表 1-17 钢铁零件常用的正火工艺

正火工艺	正火工艺过程与特点
一段式正火	将零件加热并保温适当时间至奥氏体化后,在空气中冷却到室温
二段式正火	将零件加热并保温适当时间至奥氏体化后,在静止空气中冷却到 $A_1$ 附近即转入缓冷
等温正火	将零件加热并保温适当时间至奥氏体化后,快冷至珠光体转变区的某一温度保温,获得珠光体型组织,随后在空气中冷却
多重正火	铸、锻件常采用多重正火,第一次采用 $A_{c1} + 150 \sim 200^\circ\text{C}$ 高温正火,用以消除热加工过程中可能形成的过热组织,并使难溶第二相充分固溶入奥氏体中;第二次正火使奥氏体晶粒细化 例如 20Mn、15CrMo、20CrMoV 等铸件,经过多重正火处理后,均匀化了组织,使钢的冲击韧度,特别使在低温下的冲击韧度显著提高

尽管正火的冷却方式为空冷,对于较大尺寸的零件或零件不同部位结构尺寸相差较大的铸、锻件,其表面与心部、厚处与薄处,会存在冷却速度差异,使正火后截面上的性能不均匀,出现所谓“质量效应”。表 1-18 为部分碳钢与合金钢正火硬度与质量效应的关系。

表 1-18 部分碳钢与合金钢正火硬度与质量效应的关系

钢号	正火温度( $^\circ\text{C}$ )	在下列直径(mm)时的正火硬度 HB			
		12	25	50	100
15	930	126	121	116	116
20	930	131	131	126	121
20Mn	930	143	143	137	131
30	900	156	149	137	137
40	900	183	170	167	267
50	900	223	217	212	201
60	900	229	229	223	223
80	900	293	293	285	269
95	900	302	293	269	255
12Cr2Ni4	890	269	262	252	248
40Mn2	870	269	248	235	235

(续表)

钢号	正火温度(°C)	在下列直径(mm)时的正火硬度 HB			
		12	25	50	100
30CrMo	870	217	197	167	163
42CrMo	870	302	302	285	241
50CrMo	870	375	321	311	293
40CrNiMo	870	388	363	341	321
40Cr	870	235	229	223	217
50Cr	870	262	255	248	241
60Cr	870	285	269	262	255
55Si2MnA	900	277	269	269	269

**(三) 钢铁零件退火、正火常见缺陷**

钢铁零件退火、正火常见缺陷见表 1-19。

表 1-19 钢铁零件退火、正火常见缺陷

缺陷类型	缺陷特征	补救办法
过烧	加热温度失控或控温过高,致使局部晶界氧化和部分熔化	报废处理
过热	加热温度偏高致使晶粒过度长大,以致力学性能显著降低	重新进行完全退火或正火
欠热	加热温度低或温度正确但保温不足;原材料组织不均匀	严格按工艺退火或正火
氧化、脱碳	零件未在控制气氛中进行退火或正火,使零件表面烧损,形成氧化皮,表层脱碳超出技术要求的规定	重要零件需进行复碳处理
硬度偏高	退火冷却过快或球化不良;正火冷却速度偏大	重新退火或正火
硬度偏低	过热;冷速过慢或多次退火	严格按工艺正火
网状组织	加热温度过高且冷却速度慢,形成网状铁素体或渗碳体	重新退火或正火
球化不良	球化退火后残存大块状碳化物(退火前未消除网状碳化物),或球化退火工艺控制不当出现片状碳化物	正火后重新进行球化退火
石墨碳黑斑	碳素工具钢退火后出现石墨碳,并在其周围形成大块状铁素体,是因碳素工具钢终锻温度过高(>1 000°C),冷却缓慢或退火加热温度过高,在石墨化温度范围长时间停留,或多次返修退火所致	报废处理
反常组织	在 $A_{r3}$ 温度附近冷却速度过低或在 $A_{r1}$ 以下长时间停留,先析铁素体晶界上出现粗大渗碳体,或在先析渗碳体周围出现宽铁素体条	重新退火
碳化物粗大	在规定的温度下保温时间过长,使碳化物得以较充分的聚集长大	严格按工艺退火或正火
有粗大颗粒碳化物	加热温度偏高冷速过慢;重复多次退火	先正火,然后再退火

**(四) 钢的淬火****1. 淬火的定义与目的**

淬火,即将钢加热至  $A_{c1}$  或  $A_{c3}$  以上某一温度、均温并保持一定时间进行奥氏体化后,采用适当的方式以超过临界冷却速度的速度冷却,获得马氏体或贝氏体组织的热处理工艺方法。

钢件通过淬火,得到非平衡的马氏体或贝氏体组织,再经后续的回火处理,塑造钢的显微组织与力学性能,提高零件的耐磨性和抗疲劳性能,确保零件在工况下的可靠性和使用寿命。钢淬火工艺加热参数的选择见表 1-20。

表 1-20 钢淬火工艺加热参数的选择

钢的种类	加 热 温 度	加热—均温—保温时间
亚共析钢	$A_{c3} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$	取决于钢的化学成分、零件有效厚度、加热用炉型与加热介质、装炉量与装炉方式 对于大直径零件,常采取阶梯加热的方式,控制零件表面层与心部的温度差
共析钢 过共析钢	$A_{c1} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$	
一般合金钢	$A_{c1}$ 或 $A_{c3} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$	
高速钢 高合金钢	根据合金碳化物溶入奥氏体的程度及淬火试验时的晶粒度大小决定	

零件在保温阶段加热停留的时间,决定了零件热处理的质量。一般可参照以下经验公式估算:

$$t = a \cdot k \cdot H$$

式中  $t$ ——保温时间(min);

$a$ ——钢在不同介质中加热时的保温系数(min/mm),见表 1-21;

$k$ ——零件装炉方式调整系数,见表 1-22;

$H$ ——零件有效厚度(mm),见图 1-2。

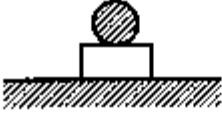


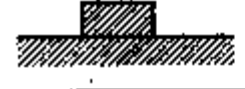








表 1-21 钢在不同介质中加热时的保温系数

(min/mm)

材料种类	直径(mm)	在 $<650^{\circ}\text{C}$ 气体介质 <sup>①</sup> 中加热	$780 \sim 900^{\circ}\text{C}$ 气体 介质 <sup>①</sup> 中加热	$770 \sim 880^{\circ}\text{C}$ 盐浴 介质中加热	$1050 \sim 1300^{\circ}\text{C}$ 盐浴介质中加热
碳素钢	$\leq 50$	—	0.8~1.2	0.3~0.5	—
	$> 50$	—	1.0~1.5	0.4~0.5	—
低合金钢	$\leq 50$	—	1.5~1.8	0.8~1.0	—
	$> 50$	—	1.5~2.0	1.0~1.2	—
高合金钢	—	0.4~0.6	—	0.3~0.4	0.2~0.3
高速钢	—	—	0.8~1.0	0.4~0.5	0.14~0.25

注: ① 气体介质为空气。

表 1-22 室式炉零件装炉方式调整系数

装炉方式	调整系数	装炉方式	调整系数
	1.0		1.0
	1.0		1.4
	2.0		4.0
	1.5		2.2
	1.3		2.0
	1.7		1.8

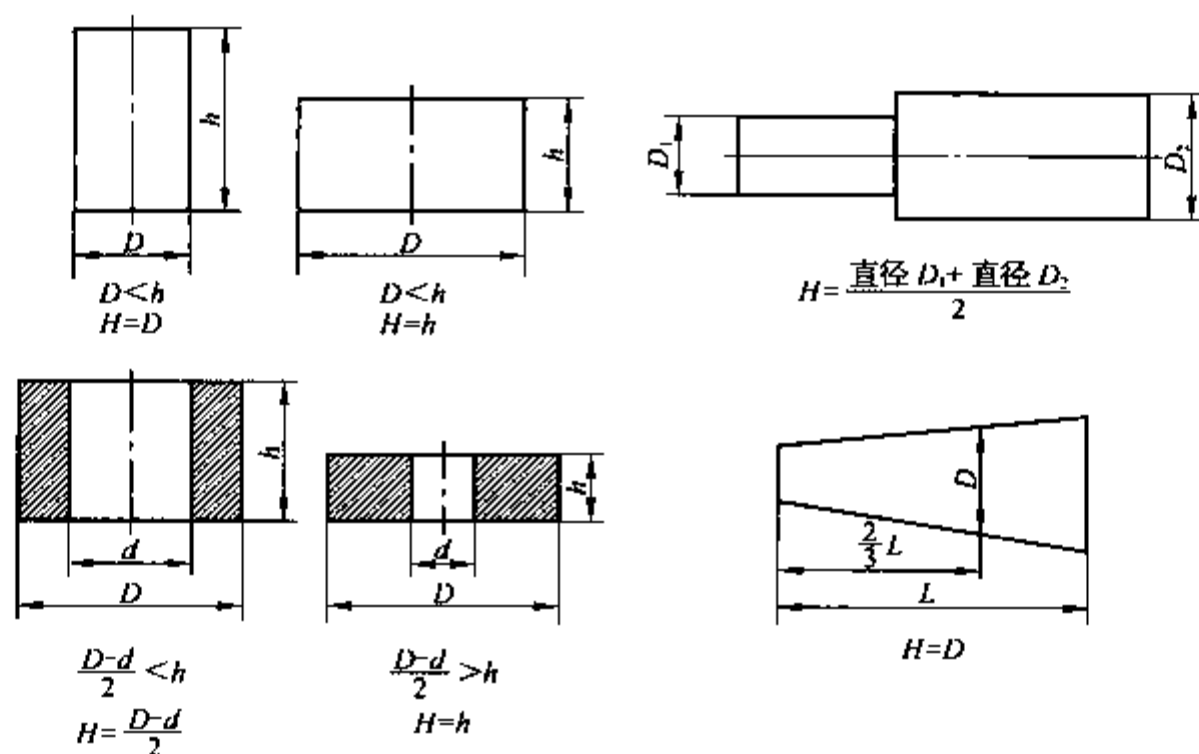


图 1-2 零件有效厚度的计算示例

## 2. 钢的常用淬火冷却方法

钢的淬火冷却方法可以按淬火冷却方式、淬火冷却介质、淬火冷却后的组织等分类,每一种淬火方法在生产实践中,结合具体零件的材料、组织性能要求和具体生产装备条件,又可以演绎出若干种工艺变化。钢的常用淬火冷却方法见表 1-23。热处理生产实践中若干其他的淬火方法见表 1-24。

热处理生产实践中,根据材料和零件的具体要求,淬火工艺方法还有多种灵活的变化。例如:

1) 中碳钢的高温淬火 40CrNiMo 钢加热温度从 870℃ 提高至 1 200℃,淬火后获得板条马氏体,不经回火,断裂韧性( $K_{Ic}$ )将提高 70%。但新近的研究表明,改变工艺会导致冲击功有所下降。

2) 高碳钢的低温短时加热淬火 高碳钢在稍高于  $A_{c1}$  的低温短时快速加热,可以调整钢中奥氏体的碳含量,从而改变淬火后的组织形态和力学性能。不仅因淬火温度低使马氏体细化,而且由于降低了奥氏体中的碳含量,有利于获得一定数量的板条马氏体。最终的组织为很细的板条马氏体和片状马氏体、自由碳化物和少量残留奥氏体。

表 1-23 钢的常用淬火冷却方法

淬火冷却方法	工艺曲线示意图	工艺特点	应用
单介质淬火		将已奥氏体化的零件在一种冷却介质中冷却,完成马氏体转变 常用单一冷却介质有: 液态——水、油、盐(碱)水、有机聚合物水溶液、低温盐浴等 气态——空气、氮气、氢气、氩气等	广泛用于各种结构钢的淬火,有选择地用于工、模具钢等的常规淬火以及真空炉气冷淬火
双介质淬火		将已奥氏体化的零件先在冷却能力较高的介质中冷却至 $M_s$ 点稍高温度,然后立即转入冷却能力较低的介质中完成马氏体转变 常用冷却介质组合为:水-油、水-空气、水-低温盐浴、油-空气等	用于中、高合金钢淬火以及尺寸较大、结构较复杂零件淬火。可以减少零件的畸变与开裂倾向

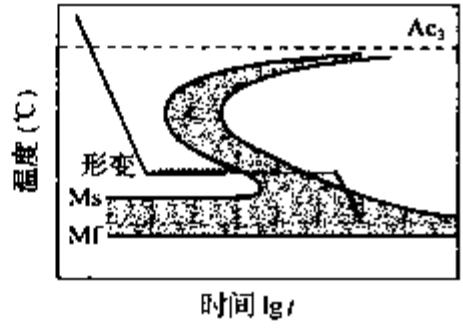
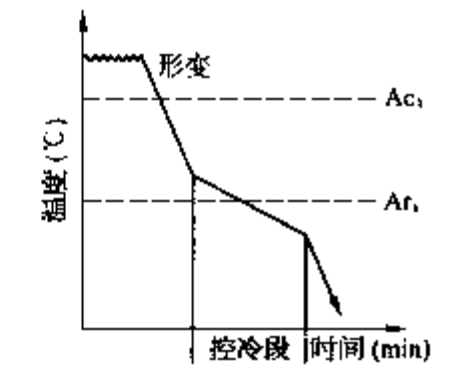
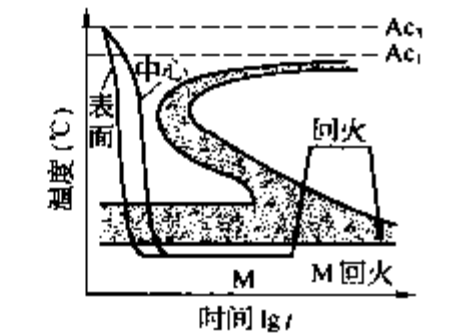
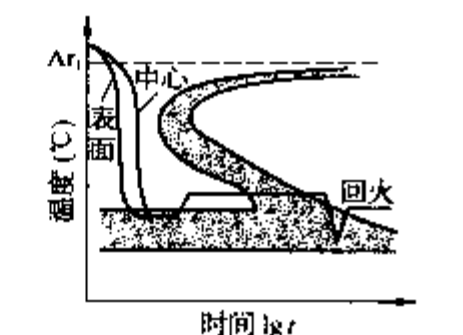
(续表)

淬火冷却方法	工艺曲线示意图	工艺特点	应用
预冷淬火		<p>将已奥氏体化的零件在一种冷却速度缓慢的介质中冷却至 <math>A_{c3}</math> 或 <math>A_{r3}</math> 稍高温度, 或将零件的危险部位预冷, 出现部分非马氏体组织, 再整体淬火 预冷时间凭经验控制</p>	<p>用于零件结构较复杂、不同部位截面尺寸相差较大、易产生淬火开裂或畸变的零件淬火</p>
马氏体分级淬火		<p>将已奥氏体化的零件浸入温度稍高于或稍低于 <math>M_s</math> 点的盐浴中, 保持一定时间, 待零件整体温度与盐浴温度一致时, 转入空冷, 获得马氏体组织</p>	<p>用于高碳工具钢及合金工具钢制造的工具、模具等淬火, 可减小淬火应力</p>
贝氏体等温淬火		<p>将已奥氏体化的零件快冷至贝氏体转变区进行等温, 获得的主要是贝氏体组织, 不仅零件畸变小, 且具有较高的硬度和韧性</p>	<p>用于结构形状复杂的中高合金工具钢, 以及 <math>w_c &gt; 0.6\%</math> 的碳钢小截面零件、球墨铸铁件淬火</p>

表 1-24 其他淬火方法

淬火冷却方法	工艺曲线示意图	工艺特点	应用
高温形变淬火		<p>将零件坯料加热至 <math>A_{c3}</math> 以上较高温度进行形变(热锻或热轧), 直接进行淬火(温度在 <math>A_{r3}</math> 以上), 获得较粗大的板条状马氏体组织。是锻(轧)与淬火工艺的结合</p>	<p>用于亚共析钢零件锻(轧)后直接淬火。具有零件性能可靠、工艺流程简化、节能降耗的特点</p>
中温形变淬火		<p>在稍高于 <math>A_{c3}</math> 的温度保温后, 冷至中温区域对奥氏体组织进行塑性变形, 再结晶后获得超细奥氏体晶粒, 进行淬火</p>	<p>由于形变温度较低, 变形抗力较大, 要求变形速度快, 需要较大压力的锻压设备, 仅用于某些弹簧、轴承、钢丝等结构简单的小型零件</p>

(续表)

淬火冷却方法	工艺曲线示意图	工艺特点	应用
低温形变淬火		<p>将零件坯料加热至 <math>Ac_3</math> 以上温度保温一段时间后,急冷至较低的亚稳奥氏体区的温度范围,对过冷奥氏体进行一定量的形变(热锻或热轧),随后直接进行淬火,以获得马氏体组织</p>	<p>用于亚共析钢零件锻(轧)后直接淬火。在保证塑性的情况下,较大幅度提高强度,改善抗磨损能力</p>
高温形变-控温空冷		<p>将非调质钢坯料加热至 <math>Ac_3</math> 以上较高温度进行形变(热锻或热轧),随后在不同温度区间以不同的冷却速率进行控制空冷,获得铁素体、珠光体或贝氏体组织,满足零件的最终力学性能要求,以控温空冷为最终热处理</p>	<p>用于热锻非调质钢的锻(轧)-热处理,能获得较高的强韧性能,并具有工艺流程简化、节能降耗的特点</p>
亚共析钢的亚温淬火		<p>将零件加热至 <math>Ac_1 \sim Ac_3</math> 温度区间,<math>\alpha</math> 和 <math>\gamma</math> 两相共存,部分奥氏体化(仍有部分铁素体存在)后淬火,获得较细的马氏体及铁素体混合组织</p>	<p>用于低、中碳钢及低合金结构钢的淬火,可以抑制回火脆性,减少畸变,降低临界脆化温度(FATT)</p>
低碳马氏体淬火	同单介质淬火	<p>将零件加热至 <math>Ac_3</math> 以上较高温度后,进行强烈淬火(淬火介质一般用水、5%~10% NaCl 水溶液等),获得低碳马氏体组织</p>	<p>用于低碳钢及低碳合金钢淬火。经低温回火后,获得高的强韧性,可以代替中碳钢调质处理</p>
复合淬火		<p>将已奥氏体化后的零件急冷至 <math>M_s</math> 以下获得 10%~20% 马氏体,然后在下贝氏体温度区等温。这种冷却方法可使较大截面的零件获得 M+B 组织。预淬时形成的马氏体可促进贝氏体转变,在等温时又使马氏体回火</p>	<p>适用于合金工具钢零件,可避免第一类回火脆性,减少残留奥氏体量及畸形开裂倾向</p>

(续表)

淬火冷却方法	工艺曲线示意图	工艺特点	应用
奥氏体晶粒超细化处理		<p>将零件反复迅速加热至稍高于 <math>A_{c3}</math> 的温度后急冷至室温, 在 <math>\alpha-\gamma</math> 相变区域进行循环地急冷急热处理, 随后淬火。循环周次依据钢种的不同条件而定</p>	<p>可以显著地细化晶粒, 提高钢的强韧性能</p>
奥氏体碳化物双细化处理	<p>在零件最终热处理前增加:                      1) 进行锻造余热淬火+高温回火                      2) 进行高温固溶处理+高温回火或短时间的球化退火                      3) 实施第2)种工艺后, 增加一次低温淬火                      以上方法可使钢中的角状碳化物的棱角变圆, 粒度变细, 不均匀度降到1.5级。同时使奥氏体的晶粒度达到12级的超细化水平</p>		<p>适用于 Cr12 系莱氏体钢的热处理, 使钢的冲击韧度成倍提高, 模具使用寿命大幅度提高</p>
模压淬火		<p>方法1: 零件在奥氏体化后, 在特定夹具中紧压淬火。处于室温的夹具, 起到冷却介质的作用                      方法2: 零件在奥氏体化后, 在特定夹具中紧压后, 在某一淬火介质中淬火                      两种方法均可有效控制并减少零件的畸变</p>	<p>方法1: 适用于薄片、薄板类小型零件的淬火                      方法2: 适用于多种盘形齿轮、离合器摩擦片、细长杆件等零件的淬火</p>
风冷喷液喷雾淬火		<p>风冷: 将已奥氏体化后的零件置于风冷装置中, 用压缩空气定向高速吹向零件表面进行淬火                      喷液: 将已奥氏体化后的零件置于喷液装置中, 用液态介质定向喷向零件局部表面进行淬火                      喷雾: 将已奥氏体化后的零件通过专用喷雾装置, 对零件的表面进行持续冷却</p>	<p>风冷: 适用于高淬透性材料制造的零件淬火                      喷液: 适用于零件的局部淬火, 随后还可根据需要对零件进行整体淬火                      喷雾: 适用于大型轴类零件, 如转子、支撑辊等, 冷却速度和冷却部位可以进行调节</p>



(续表)

淬火冷却方法	工艺曲线示意图	工艺特点	应用
磁场热处理	—	在热处理时,从材料外部加一磁场,使材料的磁学性能起变化,并影响其相变过程。热处理时软磁材料和硬磁材料所用磁场强度不同	对于淬火后具有马氏体的钢,在高强度脉冲磁场影响下,可使马氏体转变温度明显提高;对于40CrNi2Mo钢,其淬火后的强度较普通淬火提高25%~50%

### 3. 马氏体转变时的体积变化

不同碳含量的钢,在发生马氏体转变时体积的变化见表1-25。

表1-25 不同碳含量的钢在发生马氏体转变时体积的变化

钢的碳质量分数 $w_c$ (%)	马氏体的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	退火态的密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	转变为马氏体的体积变化 (%)
0.1	7.918	7.927	+0.113
0.3	7.889	7.921	+0.401
0.6	7.840	7.913	+0.923
0.85	7.808	7.905	+1.227
1.0	7.778	7.901	+1.557
1.30	7.706	7.892	+2.576
1.70	7.582	7.880	+3.781

### 4. 钢的常见淬火缺陷

钢的常见淬火缺陷见表1-26,零件淬火变形特征见表1-27。

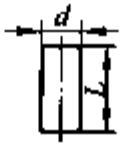
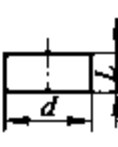
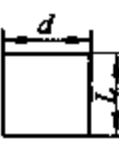
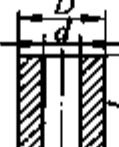
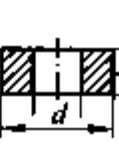




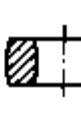

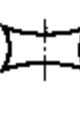


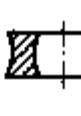

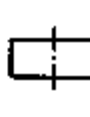



表1-26 钢的常见淬火缺陷

缺陷类型	产生原因	预防对策
淬火畸变	零件在淬火加热或冷却,尤其是冷却过程中,在热应力(温差变化引起)和组织应力(组织比容变化引起)的共同作用下,零件的尺寸和形状发生变化	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 选择淬透性较好的钢</li> <li>2) 合理的零件结构设计,减少截面尺寸悬殊与尖角</li> <li>3) 正确的零件预备热处理</li> <li>4) 采取合理的加热与冷却工艺方法</li> <li>5) 对畸变零件进行矫正</li> </ol>
淬火开裂	零件在淬火冷却过程中,热应力和组织应力叠加超过了零件的断裂强度,形成不同形态的淬火裂纹	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 选择淬透性较好的钢</li> <li>2) 合理的零件结构设计,减少截面尺寸悬殊与尖角</li> <li>3) 正确的零件预备热处理</li> <li>4) 采取合理的加热与冷却工艺方法</li> </ol>
氧化、脱碳	零件的淬火加热过程中未进行表面防护(在氧化性气氛中加热或盐浴脱氧不充分等),零件表面产生氧化物或表面层含碳量降低	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 避免在氧化性、脱碳性介质中加热</li> <li>2) 重要零件可预留精加工余量,确保去除氧化、脱碳层</li> <li>3) 零件表面刷涂防氧化、脱碳、渗碳涂料</li> </ol>

(续表)

缺陷类型	产生原因	预防对策
过热	加热温度偏高致使晶粒过度长大,以致力学性能显著降低	1) 正确选择加热温度、确定保温时间 2) 严格监控炉温,防止跑温现象发生
过烧	加热温度失控或控温过高,致使局部晶界氧化和部分熔化	1) 校正并严格控制加热炉温度 2) 每批高速钢淬火前严格执行晶粒度-炉温验证制度
硬度不足、软点	零件因淬火加热不足、表面严重氧化脱碳、冷却能力不足等,导致零件淬火后硬度偏低 软点属于零件表面局部硬度不足	1) 对零件进行正确的加热 2) 防止表面严重氧化脱碳 3) 正确的冷却介质与冷却方法
其他组织缺陷	尽管零件淬火硬度合格,但在淬火马氏体级别、残留奥氏体数量、未溶铁素体数量、碳化物分布形态等项目中,有一项或几项未满足技术要求	针对具体情况,从淬火加热温度的选择与控制、适当的保温时间两个方面进行调节

表 1-27 零件淬火畸变特征

零件类别	轴类	扁平形	正方形	圆(方)孔体	扁圆(方)孔体
原始状态					
热应力作用					
组织应力作用					
体积效应作用					

### (五) 钢在回火时的转变

#### 1. 钢的回火分类

回火是零件淬火后,根据零件的性能要求(生产现场一般以控制硬度为目标),将零件在加热炉中加热至  $A_{c1}$  以下某一温度并保温一定时间后,以规定的冷却方式冷却至室温的热处理工艺。

按照回火温度的不同,可将回火分为低、中、高温回火(表 1-28),回火后的组织与性能视回火温度而定。

表 1-28 钢的回火及时效工艺分类

回火温度区间	回火目的	应用范围
150~250℃ (低温回火)	获得回火马氏体组织,回火后零件具有高硬度和高耐磨性能,消除了淬火应力与脆性,改善了零件淬火后的韧性及组织稳定性	用于要求高硬度、高耐磨性能零件的场合。例如量具、刀具、冷冲压剪切模具、轴承内外圈及滚动体、渗碳及碳氮共渗零件等
350~500℃ (中温回火)	获得回火托氏体组织,回火后零件具有适中的硬度、高的弹性极限和韧性	用于要求具有弹性的零件如各类弹簧、热作模具等

(续表)

回火温度区间	回火目的	应用范围
>500℃ (高温回火)	获得回火索氏体组织,回火后零件具有良好的综合力学性能	用于结构钢制造的各种工况下承受复杂应力的结构零件
人工时效 钢 100~150℃ 铸铁 500~600℃	消除零件的内应力,减少零件在加工过程中的变形,稳定零件尺寸精度	用于精密量具、工模具、滚动轴承、丝杠的处理,以及大型铸件的去应力处理
自然时效 零件较长时间置于大气环境中		

### 2. 钢在回火时的转变

钢在淬火后得到马氏体及残留奥氏体,马氏体是过饱和固溶体,残留奥氏体是过冷固溶体,均属于亚稳相,在回火过程中将发生一系列转变(表 1-29)。

表 1-29 碳钢在淬火后回火过程中的组织转变

组织转变阶段	回火温度 (℃)	组 织 转 变	
		低碳板条马氏体( $\alpha'$ 相)	高碳片状马氏体( $\alpha'$ 相)
回火准备阶段 (碳原子偏聚)	25~100	C(N)原子在马氏体中位错线附近偏聚, $\omega_C$ 达 0.20%时,接近过饱和状态	在马氏体中的孪晶界面富集,小片状尺寸约 0.3 nm×0.6 nm×0.7 nm
回火第一阶段 (马氏体分解)	80~250	$\omega_C < 0.2\%$ 时,钢中碳原子继续偏聚,而马氏体不分解(不析出 $\epsilon$ -碳化物,即 $\epsilon$ -Fe <sub>3</sub> C)	分两个阶段进行。第一阶段 $\alpha' \rightarrow M'(\alpha + \epsilon - Fe_3C)$ ,其中 $\alpha$ 相的 $\omega_C$ 约 0.25%,与 $\epsilon$ 相保持共格, $M'$ 称回火马氏体。 $>150^\circ\text{C}$ 时进入第二阶段, $\alpha$ 相正方度 $\approx 1$ , $\omega_C$ 接近平衡态,分解完成(约 300℃)
回火第二阶段 (残留奥氏体分解)	200~300	$\omega_C < 0.4\%$ 时,淬火钢中不出现残留奥氏体	$\omega_C > 0.4\%$ 淬火钢中的残留奥氏体转变为下贝氏体或回火马氏体
回火第三阶段 (渗碳体形成)	250~400	马氏体中碳原子全部析出。 $\alpha'$ 相中直接析出非共格 $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C( $<0.2\%$ 碳钢); $\alpha'$ 相中析出 $\epsilon$ -Fe <sub>3</sub> C,再转变成非共格 $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C( $>0.2\%$ 碳钢)。 $\alpha$ 相保持板条状形态。 $\alpha$ 相+ $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C 称为回火托氏体	马氏体中碳原子全部析出。 $\alpha'$ 相中析出 $\epsilon$ -Fe <sub>3</sub> C,再转变为 $\chi$ -Fe <sub>3</sub> C <sub>2</sub> ,再转变为非共格的 $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C( $>0.4\% \sim 0.6\%$ 碳钢),回火后铁素体仍保留马氏体形态。 $\alpha$ 相+ $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C 称为回火托氏体
回火第四阶段 ( $\alpha$ 相状态的变化及碳化物聚集长大)	>400℃	1) $>500^\circ\text{C}$ ,第一类和第二类残留内应力全部消除,当 $\alpha$ 相与非共格 $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C 形成,第三类内应力基本消除;同时淬火畸变和碳化物析出造成的弥散畸变减小 2) $>500^\circ\text{C}$ $\alpha$ 相亚晶粒不断长大 3) $>400^\circ\text{C}$ 板条马氏体中位错胞和位错线逐渐消失,出现回复,仍呈细板条状; $>600^\circ\text{C}$ 开始再结晶获得较低位错密度的等轴 $\alpha$ 相晶粒; $>250^\circ\text{C}$ 片状马氏体中孪晶逐渐消失,出现位错胞和位错线; $>400^\circ\text{C}$ 孪晶全部消失,同时 $\alpha$ 相开始回复; $>500^\circ\text{C}$ 开始再结晶 4) $>400^\circ\text{C}$ , $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C 开始聚集长大; $>600^\circ\text{C}$ 迅速聚集和粗化 5) 等轴 $\alpha$ 相+粒状 $\theta$ -Fe <sub>3</sub> C 的组织称回火索氏体	

### 3. 钢的回火脆性与其他回火缺陷

淬火钢回火后力学性能总的变化趋势是,随着回火温度由低到高,钢的强度和硬度下降,塑性和韧性上升。

但有些钢种在一定的温度范围回火后,冲击韧度反比在较低温度回火态的显著下降,这种现象称为回火脆性。回火脆性分为两类:低温回火脆性和高温回火脆性,见表 1-30。其他回火缺陷见表 1-31。

表 1-30 钢的两类回火脆性

回火脆性类型	出现回火脆性的温度范围(°C)	特 征	消 除 办 法
低温回火脆性 (第一类回火脆性)	几乎所有的淬火钢在 200~400°C 回火都会不同程度地出现脆性	具有不可逆性,即将已产生脆性的钢置于更高的温度回火,其脆性逐渐消除;再置于低温回火脆性温度区回火,脆性也不重新出现	至今尚未找到有效的方法完全消除这种回火脆性,只能尽量避开这一温度范围回火,或采用等温淬火工艺代替。在钢中加入 $\omega_{\text{Ni}}$ 1%~3%,可使碳化物的析出移向较高温度范围,从而使脆性产生的温度升高
高温回火脆性 (第二类回火脆性)	这类回火脆性发生在 450~650°C 回火后	是一种可逆回火脆性,并与回火后的冷却速度有关,当缓慢地经过该温度范围时出现	选用含 $\omega_{\text{Mo}}$ 0.5% 或 $\omega_{\text{W}}$ 1% 的钢,这些元素可以阻碍杂质元素的扩散而削弱它们在晶界的富集,这一方法对大型零件尤为适合。采用在该温度范围回火后的快冷方法,能有效地抑制或减轻中小截面零件的高温回火脆性

高温回火脆性的产生,与钢中的微量杂质元素(P、As、Sb、Sn 等)或合金元素的偏聚与析出有关。图 1-3 为铬镍钢的冲击韧度与回火温度的关系。

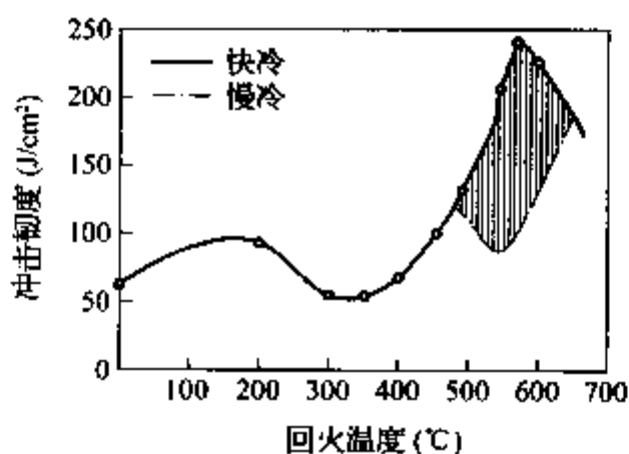


图 1-3 铬镍钢的冲击韧度与回火温度的关系

表 1-31 钢的其他回火缺陷及预防对策

缺陷类型	产生原因	预防对策
回火硬度低于技术要求	1) 淬火硬度正常,回火温度偏高 2) 淬火后硬度偏低,回火温度正常	1) 校准回火设备温度,通过试回火确定温度 2) 确保淬火硬度达到规定要求
回火硬度高于技术要求	淬火硬度正常,回火温度偏低	校准回火设备温度,通过试回火确定温度
回火后硬度不均匀	1) 小件回火装炉量大,零件回火均热—保温不足 2) 大件不同部位硬度差异,可能与炉内温差较大或零件表面质量状态(表面脱碳程度、粗加工余量差异等)有关 3) 回火保温时间不足	1) 最好选用以对流传热为主的加热炉型 2) 合理确定回火装炉量,确保全部零件能均热 3) 较充分的回火保温时间 4) 保证大件表面热处理前质量状态均匀一致
大件在回火过程中开裂	回火升温速度过快或回火后的冷却方式过于激烈,使零件表面与心部出现较高的热应力	1) 大件高温回火也应考虑阶梯加热 2) 回火后一般宜缓慢冷却

(续表)

缺陷类型	产生原因	预防对策
回火后畸变	1) 淬火畸变大,回火时缺少适当纠正措施,回火后保留甚至扩大原畸变趋势 2) 轻、薄零件回火装载挤压畸变或冷却速度不均匀出现畸变	1) 对于淬火畸变,回火时可采取必要的措施,如装专用夹具定型回火等 2) 合理装载,均匀冷却
零件表面腐蚀	在盐浴介质中回火,因氯离子等杂质因素使零件表面腐蚀	经常翻新回火盐浴,测定并控制氯离子等有害杂质含量。退火前进行认真清理

4. 钢质零件的回火工艺参数(表 1-32)

表 1-32 钢质零件的回火工艺参数

工艺参数	工艺参数确定依据
回火温度	根据零件的性能要求选择(生产现场一般依据要求的硬度决定),以 45 钢为例,回火温度与硬度有以下经验公式( $\leq 60$ HRC): $\text{回火温度} = 200 + (60 - \text{要求的洛氏硬度值}) \times 10 \quad (^\circ\text{C})$
回火时间	遵循“零件均温并完成回火转变”的原则,零件均温起计算回火时间。影响零件升温—均温的因素有: 1) 回火用炉型(即不同的加热方式)的影响,在空气介质中辐射传热升温速度较慢;对流传热稍快;盐(油)浴传导传热较快 2) 零件本体截面大、装炉总量大、密集装炉方式,升温速度较慢;零件本体截面小、装炉总量少、稀疏装炉方式,升温速度较快
回火后的冷却方式	一般零件回火出炉后空冷 具有第二类回火脆性的零件回火出炉后水冷或油冷 结构复杂可能因热应力的影响导致产生明显内应力的零件应缓冷

(六) 钢的冷处理

钢在淬火后存在一定数量的残留奥氏体,常规的回火处理不能使全部残留奥氏体转变,将影响零件的硬度、耐磨性以及零件的尺寸稳定性。为此,将淬火冷却至室温的零件继续冷却至室温以下更低的温度,使残留奥氏体继续转变为马氏体,最大限度地降低残留奥氏体量,同时使剩余的残留奥氏体趋于稳定,使零件的尺寸稳定性趋于最佳状态,并适量提高零件硬度,这一工艺被称为冷处理。

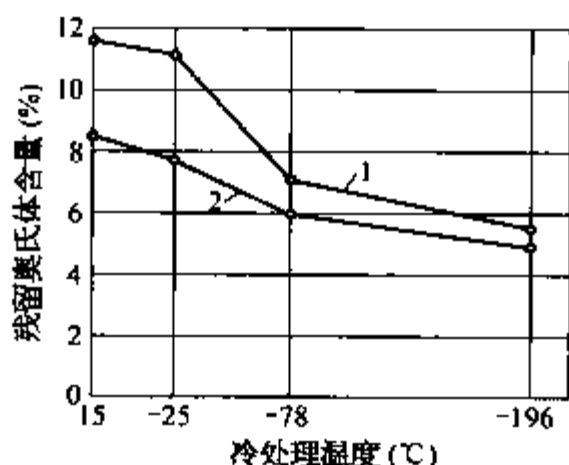


图 1-4 冷处理对两种钢残留奥氏体量的影响  
1—GCr15, 850°C 淬火; 2—GCr15SiMn, 830°C 淬火

按照 GB/T7232—1999《金属热处理工艺术语》,这一工艺有冷处理和深冷处理之分。冷处理定义为零件淬火冷却到室温后,继续在一般制冷设备或低温介质中冷却的工艺。深冷处理定义为零件淬火后继续在液氮或液氮蒸气中冷却的工艺。

冷处理应在零件淬火冷至室温时立即进行,如在室温停留时间过长,易产生奥氏体的热稳定(陈化稳定),降低深冷处理的效果。但对于结构形状复杂的零件,如果淬火后立即进行冷处理易产生开裂,可在淬火后进行一次 110~130°C 保温 0.5 h 的预先回火(但回火会使奥氏体热稳定),然后进行深冷处理。冷处理后,零件回复至室温,应严格控制在停留 4 h 内立即进行回火,否则易产生开裂现象。需要冷处理时获得低温的方法见表 1-33。冷处理对两种钢残留奥氏体量的影响见图 1-4。

零件回复至室温,应严格控制在停留 4 h 内立即进行回火,否则易产生开裂现象。需要冷处理时获得低温的方法见表 1-33。冷处理对两种钢残留奥氏体量的影响见图 1-4。

表 1-33 冷处理获得低温的方法

制冷剂种类	制冷原理与获得低温温度
干冰(固体二氧化碳)	干冰在气化过程中吸收零件热量,获得 $-65\sim-75^{\circ}\text{C}$ 低温
干冰+酒精、丙酮等液体	干冰+酒精、丙酮等液体吸收零件热量,获得 $-80^{\circ}\text{C}$ 低温
冷冻机制冷	通过冷冻剂循环制冷,获得 $-40\sim-80^{\circ}\text{C}$ 低温
液态空气(液氧、液氮)	蒸发吸收零件热量,获得 $-183^{\circ}\text{C}$ 低温
液氮	在特制蛇形管中循环制冷,获得 $-192^{\circ}\text{C}$ 低温

## 五、合金元素在钢中的作用

在碳钢的基础上,向钢中加入一定种类与数量的合金元素,可以提高钢的力学性能,改善钢的工艺性能,获得某些特殊的物理、化学性能。合金元素与铁和碳的相互作用,以及合金元素间的相互作用,会导致钢中各组成相、组织、结构发生变化,同时对钢的加热、冷却,以及回火转变都将产生不同程度的影响。这种影响可以互相加强,也可以互相抑制。

通常加入钢中的合金元素有 Cr、Mn、Si、Ni、Mo、Ti、Co、V、W、B、Al、Nb、Cu、N、Zr、RE 等。其中 Mn、Si、Mo、V、W、B、RE 等是中国富产元素。

由于炼钢用原材料、冶炼工艺方法等因素的影响,钢中总会残留少量的 Mn、Si、P、S 等杂质元素,其在钢中的含量见表 1-34。

表 1-34 钢中的杂质元素含量

杂质元素	在 钢 中 的 含 量
Mn、Si (有益杂质元素)	按 GB/T13304 钢分类标准,非合金钢 $\omega_{\text{Mn}}$ 控制在 $<1.0\%$ , $\omega_{\text{Si}}$ 控制在 $<0.50\%$
P、S (有害杂质元素)	除易切削钢中为改善切削性能适当提高其含量外,在普通质量非合金钢中, $\omega_{\text{P}}$ 和 $\omega_{\text{S}}$ 均 $\leq 0.045\%$ ;在特殊质量非合金钢中,钢的成品分析 $\omega_{\text{P}}$ 和 $\omega_{\text{S}}$ 均 $\leq 0.025\%$ ;优质非合金钢的 $\omega_{\text{P}}$ 和 $\omega_{\text{S}}$ 要求介于两者之间

### (一) 合金元素与铁和碳的作用及其在钢中的分布

#### 1. 合金元素与铁的作用

所有合金元素都会或多或少地溶入铁中形成固溶体,其中原子直径很小的如 C、N 等,形成间隙固溶体;原子直径较大的如 Mn、Ni、Co 等,形成置换固溶体;有的元素如 Cr,当超过一定量时还会与铁形成金属化合物 FeCr。合金元素与铁的作用见表 1-35。铁与合金元素组成的二元相图见图 1-5。

表 1-35 合金元素与铁的作用

对临界点的影响趋势	对相区的影响趋势	合金元素的具体影响
使 $A_3$ 升高, $A_1$ 下降	封闭 $\gamma$ 相区	随着钢中 Cr、V、Mo、W、Ti、Si、Al、P、Sb、Sn、Ge、As、Be 等合金元素的增加, $A_3$ 不断升高, $A_1$ 不断下降,直至两者相遇,使 $\gamma$ 相区完全封闭,见图 1-5a。其中 Cr 稍有例外,当 $\omega_{\text{Cr}} \leq 7\%$ 时 $A_3$ 下降、 $A_1$ 升高。上述元素中,Cr、V 能与 $\alpha$ -Fe 无限互溶,其余元素只能部分溶入
	缩小 $\gamma$ 相区	B、Nb、Ta、Zr 等合金元素虽然能使 $\gamma$ 相区缩小,它们与 $\gamma$ -Fe 和 $\alpha$ -Fe 形成有限固溶体,不能使 $\gamma$ 相区完全封闭,见图 1-5b

(续表)

对临界点的影响趋势	对相区的影响趋势	合金元素的具体影响
使 $A_3$ 下降、 $A_1$ 升高	开启 $\gamma$ 相区	Mn、Ni、Co 等合金元素与 $\gamma$ -Fe 形成无限固溶体, 使 $\gamma$ 相区扩展。当这类合金元素含量超过一定限度时, 可在室温下得到稳定的 $\gamma$ 相, 见图 1-5c。例如, Mn13 钢在室温下即为单相奥氏体组织
	扩大 $\gamma$ 相区	C、N、Cu 等合金元素只能部分溶入 $\gamma$ -Fe (在 $\alpha$ -Fe 中的溶解度更小) 形成有限固溶体。当其含量很低时可使 $\gamma$ 相区扩大; 但含量增加到一定量时, 由于形成了稳定的化合物, 反而使 $\gamma$ 相区缩小, 直至最后消失, 见图 1-5d

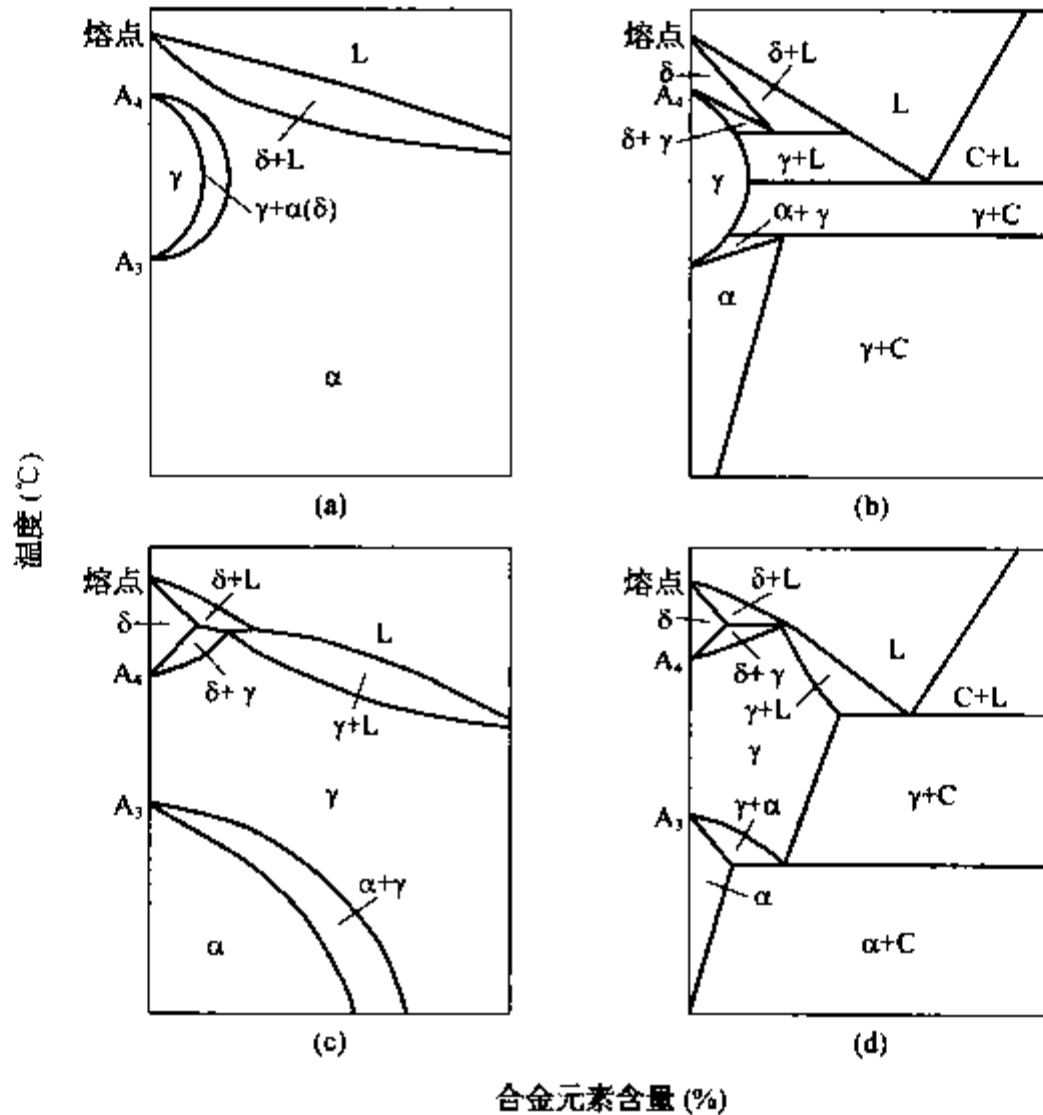


图 1-5 铁与合金元素组成的二元相图

2. 合金元素与碳的作用

合金元素与碳的作用见表 1-36。合金钢中碳化物的通常类型及其特点见表 1-37。

表 1-36 合金元素与碳的作用

元素类型	合金元素与碳的作用
非碳化物形成元素	Ni、Si、Co、Al、Cu、N、P、S 等元素在钢中不与碳形成碳化物。常溶入铁中形成固溶体或其他化合物, 如氮化物、氧化物等。Si 不仅不与碳形成碳化物, 在 C、Si 含量高的钢中还会使碳游离呈石墨状态存在, 即所谓的石墨化作用
碳化物形成元素	Ti、Mo、V、W、Cr、Mn、Fe、Nb、Zr 等属于元素周期表中的过渡族元素, 可形成碳化物。按照形成合金碳化物的稳定程度, 这些元素由强到弱排列如下: Ti、Zr、Nb、V、Mo、W、Cr、Mn、Fe

表 1-37 合金钢中碳化物的通常类型及其特点

碳化物的通常类型		合金钢中碳化物的特点
单一合金元素形成的碳化物	间隙相	TiC、WC、Mo <sub>2</sub> C 等, 具有高的熔点和稳定性, 加热时不易溶于奥氏体中
	具有复杂晶格的碳化物	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> 、Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> 、Mn <sub>3</sub> C、Fe <sub>3</sub> W <sub>3</sub> C 等, 它们的熔点和稳定性较低, 加热时易溶入奥氏体 其他元素常常能溶入碳化物, 如 Cr 溶入 Fe <sub>3</sub> C 中形成 (Fe, Cr) <sub>3</sub> C, 称为合金渗碳体, 其熔点和稳定性比前两类碳化物都低, 加热时易溶入奥氏体 有些合金元素, 如 Cr、W、Mo 等, 能在钢中形成几种碳化物。如 Cr 能形成 (Fe, Cr) <sub>3</sub> C、Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> 、Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub> 等
多种合金元素形成的碳化物		当钢中含有一种碳化物形成元素时, 它在钢中的碳化物类型取决于合金元素与碳原子比, 且与热处理状态有关 当钢中同时含有多种碳化物形成元素时, 碳化物将按这样的规律形成: 钢中碳含量较低时, 强碳化物形成元素优先与碳形成碳化物; 钢中碳含量较高时, 碳化物形成元素按由强到弱的次序形成不同的碳化物

### 3. 合金元素在钢中的分布

合金元素在钢中的存在形式及分布(表 1-38), 不仅与合金元素的种类、性质、含量及钢中的碳含量有关, 也与钢的热处理状态有关。

表 1-38 合金元素在钢中的分布

合金元素类型	合金元素在钢中的分布
非碳化物形成元素	非碳化物形成元素, 如 Ni、Si、Al、Co、Cu 等, 在退火状态下基本溶入铁素体中, 在碳化物中溶解极微。在淬火加热时, 溶入奥氏体的合金元素, 淬火后存在于马氏体和残留奥氏体中; 低温回火时, 合金元素不发生重新分布, 而在 400℃ 以上温度回火时, 存在于铁素体中
强碳化物形成元素	碳化物形成元素, 如 V、Zr、Nb、Ti、Ta 等, 在退火状态下, 如果合金元素含量较少而钢中的含碳量足够时, 大部分存在于碳化物中, 形成合金渗碳体或特殊碳化物, 仅在缺少碳的情况下, 才进入固溶体。在淬火状态下, 溶入奥氏体的合金元素存在于马氏体和残留奥氏体中; 不能溶入奥氏体的合金元素淬火后通常存在于原先的合金碳化物中。在淬火回火状态下, 溶在固溶体中的强碳化物形成元素在低温回火时不作重新分布, 在 400℃ 以上温度回火时, 才对碳化物和合金碳化物的转变有影响。在正火状态下, 合金元素在钢中的分布视正火后的组织而定。若正火组织与退火相似, 其分布与退火状态相似; 若正火组织与淬火状态相似, 其分布与淬火状态相似
弱碳化物形成元素	弱碳化物形成元素, 如 Mn、Cr、W、Mo 等, 一部分进入固溶体中, 一部分进入渗碳体中形成合金渗碳体。Mn 大部分进入固溶体, 少部分进入渗碳体。当弱碳化物形成元素的含量超过一定限度, 而钢中碳量又足够时, 将形成它们各自(Mn 除外)的特殊碳化物, 如 (Fe, Cr) <sub>7</sub> C <sub>3</sub> 、(Fe, W) <sub>6</sub> C 等
与 O、N、S 相互化合的元素	合金元素除溶解于奥氏体和铁素体中或形成碳化物外, 元素 Al、Si、Ti 等, 极易与钢中的 O、N 化合形成稳定的氧化物和氮化物, 如 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、SiO <sub>2</sub> 、MnO、TiO <sub>2</sub> 、AlN、TiN 等。Mn、Zr、Ce 等元素还能与 S 化合, 形成硫化物(如 MnS)杂质
其他	有的合金元素超过其在钢中的溶解度时, 将以较纯的金属相存在, 如 Cu、Pb 等。当合金元素含量较高时, 有的元素与 Fe 化合, 有的元素彼此间互相化合形成金属化合物, 如 FeSi、FeCr、Ni <sub>3</sub> Ti 等

## (二) 合金元素对 Fe-Fe<sub>3</sub>C 状态图的影响

在合金钢中合金元素都是以三元以上的组元相互联系的, 三者间的相互组元是极其复杂的, 实际上总是以 Fe-Fe<sub>3</sub>C 状态图为出发点, 考虑合金元素加入钢中对 Fe-Fe<sub>3</sub>C 状态图的影响。

### 1. 对 S 点及 E 点影响

对 S 点的影响, 即改变共析点的温度(A<sub>1</sub>)及共析含碳量。Mn、Ni 等元素降低 A<sub>1</sub>; Cr、Mo、Si 等元素使 A<sub>1</sub> 升高。所有合金元素均使共析含碳量减少, 使 S 点左移。合金元素的加入可以使亚共析碳钢变成共析或过共析组织的合金钢, 如 40 钢加入 13%(质量分数)Cr 后, 变成为 40Cr13 过共析钢。



对 E 点的影响,即改变奥氏体的最大溶碳量。Mn、Ni 等元素使 E 点左下移;Cr、Mo、Si 等元素使 E 点左上移。E 点左移就意味着出现莱氏体的碳含量降低,如 W18Cr4V 高速钢  $\alpha_c$  仅 0.70%~0.80%,但已属于莱氏体钢。

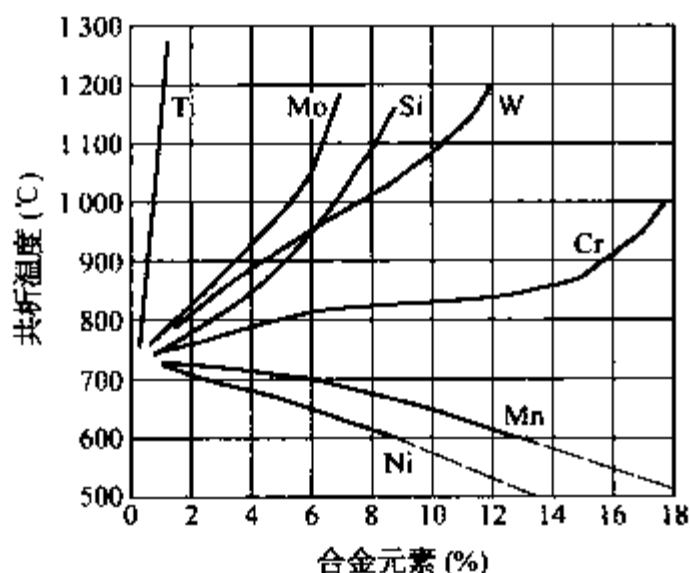


图 1-6 合金元素对共析温度的影响

### 2. 对 GS、ES 线的影响

GS 线向下移动表明临界点  $A_1$  和  $A_3$  下降。S 点、GS 线、ES 线向上移动表明临界点  $A_1$ 、 $A_3$  和  $A_{cm}$  上升。常用几种合金元素共析温度的影响见图 1-6。

### (三) 合金元素对钢的相变和热处理的影响

合金钢加热奥氏体化的过程与碳钢相同,包括奥氏体的形成、残留碳化物的溶解、奥氏体的均匀化和奥氏体的晶粒长大等四个阶段。合金元素的存在将对上述不同阶段产生影响。

#### 1. 合金元素对奥氏体形成速度的影响

奥氏体的形成速度取决于奥氏体的形核与核长大的速度。合金元素加入钢中,一方面改变了奥氏体的形成温度,即改变了  $A_1$ 、 $A_3$ 、 $A_{cm}$  点的位置;另一方面也改变了碳在钢中的扩散速度。

Co、Ni 能提高碳在奥氏体中的扩散速度,从而增大奥氏体的形成速度。

Si、Al、Mn 对碳在奥氏体中的扩散速度影响不大,对奥氏体的形成速度几乎不产生影响。

Cr、Mo、W、Ti、V 等属于碳化物形成元素,与碳有较大的亲和力,会阻碍碳在钢中的扩散,从而减慢奥氏体的形成速度。

#### 2. 合金元素对残留碳化物溶解的影响

合金钢被加热到铁素体全部转变为奥氏体后,还有一部分未溶碳化物存在。为增加奥氏体的合金化程度,充分发挥合金元素的作用,可通过提高淬火加热温度使残留碳化物充分地溶解于奥氏体,有时淬火加热温度需超过临界温度数十度乃至数百度。各种碳化物的稳定性各不相同,因而溶解温度和溶解速度也不相同。Cr 的碳化物在 850℃ 以上能大量溶解;W、Mo 的碳化物在 950℃ 以上能显著溶解;V、Ti、Nb 的碳化物要在 1050℃ 以上才溶解;W18Cr4V 高速钢的临界点温度  $A_1$  约 820℃,而淬火加热温度却高达 1260~1300℃。

#### 3. 合金元素对奥氏体均匀化的影响

奥氏体刚形成时,碳和合金元素在奥氏体中的分布是不均匀的,奥氏体均匀化需要碳及合金元素的扩散。合金元素的扩散速度很慢,当有碳化物形成元素存在时,将降低碳在奥氏体中的扩散。因此,合金钢的奥氏体均匀化,所需时间比碳钢长。

#### 4. 合金元素对奥氏体晶粒长大的影响

合金元素对奥氏体晶粒长大的影响见表 1-39。

表 1-39 合金元素对奥氏体晶粒长大的影响

合金元素的影响类型	影响奥氏体晶粒长大的合金元素
强烈阻止奥氏体晶粒长大	V、Ti、Nb、Zr、Al 等元素,在钢中易形成稳定的碳化物、氮化物或氧化物等化合物,即使加热到较高温度,仍有部分未溶碳化物处于晶界上,强烈阻止奥氏体晶界迁移,机械地阻碍晶粒长大 Al 不是碳化物形成元素,当与钢中的 O、N 形成高熔点的 $Al_2O_3$ 、AlN 质点,分布在晶界上,起到阻碍奥氏体晶界迁移的作用
中等程度阻止奥氏体晶粒长大	W、Mo、Cr 等元素,在钢中能与碳形成稳定的碳化物,仍能阻碍奥氏体晶粒长大,作用较 V、Ti、Nb、Zr、Al 等元素稍弱
能阻止奥氏体晶粒长大	Si、Co、Ni、Cu 等非碳化物形成元素,在钢中能降低晶界的能量,减缓奥氏体长大速度
促使奥氏体晶粒长大	P、Mn、C 等元素,能提高晶界能量,增加奥氏体晶粒长大倾向

#### (四) 合金元素对过冷奥氏体转变的影响

合金元素对过冷奥氏体转变的影响见表 1-40。

表 1-40 合金元素对过冷奥氏体转变的影响

影响的对象	合金元素对过冷奥氏体转变的影响程度
对珠光体转变的影响	合金元素(除 Co 以外)总是不同程度地推迟珠光体转变,使珠光体转变曲线右移。减缓程度(作用递减)顺序为: Mo、Mn、W、Cr、Ni、Cu、Si、V、Al、(Co),前四种元素的延缓作用较为显著 合金元素对珠光体相变温度区域的影响:凡扩大 $\gamma$ 区的元素,如 Ni、Mn、Cu 等,降低 $A_1$ 点,使珠光体相变移向较低温度;凡缩小 $\gamma$ 区的元素,如 Si、Al、Cr、W、Mo、V 等,提高 $A_1$ 点,使珠光体相变移向较高温度
对贝氏体转变的影响	Mn、Cr、Ni 等,降低贝氏体转变温度。Mo、W 等一方面使贝氏体转变温度下降,又使珠光体转变温度升高,从而使得珠光体和贝氏体转变曲线分离,出现两个“鼻子”,其间夹有一个稳定的奥氏体存在区。 Co、Al 均使奥氏体稳定性下降,加速贝氏体的形成 按合金元素对贝氏体转变推迟作用的程度,由强到弱: Mn、Cr、Ni、Si、Mo、W、V、Cu、(Al)、(Co)
对马氏体转变的影响	合金元素对马氏体转变的影响,主要表现在对钢的马氏体转变温度( $M_s \sim M_f$ )的影响 合金元素对 $M_s$ 的影响: Mn、Cr、Ni、Mo 等使 $M_s$ 点下降;Cu 的作用不大, Si 基本无作用;Co、Al 提高 $M_s$ 点 合金元素对 $M_f$ 的影响: $M_f$ 点很难测定,凡提高 $M_s$ 点的元素同样提升 $M_f$ 点;凡降低 $M_s$ 点的元素也都使 $M_f$ 点降低,不过降低程度比 $M_s$ 点小
对钢淬透性的影响	提高淬透性元素: C、Mn、P、Si、Ni、Cr、Mo、B、Cu、Sn、As、Sb、Be、N 对淬透性影响不大的元素: Al(其作用尚未肯定) 降低淬透性的元素: S、Co、Te、Se、W、V、Nb、Zr、Ta、Ti。其中后五种元素形成碳化物时会降低淬透性,如溶入固溶体则会提高淬透性

#### (五) 合金元素对淬火钢回火转变的影响

合金元素对淬火钢回火转变的影响见表 1-41。

表 1-41 合金元素对淬火钢回火转变的影响

影响的对象	合金元素对淬火钢回火转变的影响
对马氏体分解的影响	在 150℃ 以下回火,马氏体发生分解,析出 $\epsilon$ 碳化物。此时碳原子只作近程扩散,合金原子不作扩散,对碳原子的扩散影响很小 在高于 150℃ 回火,马氏体发生分解, $\epsilon$ 碳化物继续生核并从周围的马氏体中得到碳原子而生长。此时碳原子需作较远距离的扩散,合金元素通过影响碳原子的扩散对马氏体分解产生作用。碳化物形成元素(Cr、W、Mo、V、Zr、Ti 等)阻碍碳从马氏体中析出,使马氏体的分解速度减慢。Si 是非碳化物形成元素,也能阻碍碳的扩散,使马氏体分解延缓。Ni、Mn 等元素对马氏体分解几乎无影响
对残留奥氏体转变的影响	合金元素一般都提高残留奥氏体的分解温度范围。Cr、Mn、Si 等元素显著提高残留奥氏体分解温度,Ni、Mo、Cu、V 的作用较弱,Co 的影响不大
对碳化物类型转变的影响	低温回火时合金元素(除 Si 以外)对 $\epsilon$ 碳化物的分解几乎无影响。随着回火温度升高,将发生碳化物类型的转变,合金元素在铁素体和碳化物之间将发生重新分布和特殊碳化物转变两个过程
对 $\alpha$ 相回复、再结晶及碳化物球化、粗化的影响	合金钢中的合金元素阻碍了马氏体的分解,从而使 $\alpha$ 相马氏体形态保持到更高回火温度,提高了铁素体的再结晶温度。W、Mo、Nb 等元素对 $\alpha$ 相再结晶过程阻碍作用最强烈,Al、Si、V、Cr、Mn、Ni、Cu、Co 等影响较小。当回火温度超过一定值时,特殊碳化物将发生聚集长大,温度愈高,聚集愈快。此时钢的硬度下降
对回火脆性的影响	合金元素推迟马氏体的分解和碳化物的析出过程,从而推迟或削弱第一类回火脆性 碳钢对第二类回火脆性不敏感。该类回火脆性主要出现在锰钢、铬钢、铬锰钢、铬镍钢及铬锰硅钢中



2. 碳素结构钢新旧标准牌号对照(表 1-44)

表 1-44 碳素结构钢新旧标准牌号对照表

牌号	GB/T700—1988	GB/T700—2006
Q195	不分等级,化学成分和力学性能(抗拉强度、伸长率和冷弯)必须保证;但轧制薄板和盘条类产品,力学性能的保证项目,根据产品特点若有要求,可在有关标准中另行规定	不分质量等级,C、Mn含量无下限;P、S含量分别从0.045%和0.05%降低至0.035%和0.040%。上屈服强度 $R_{eH}$ 值仅供参考,不作为交货条件
Q215	A级、B级(做常温冲击试验,V形缺口)	A级、B级 20℃冲击吸收功 $A_k \geq 27 J$
Q235	A级(不做冲击试验) B级(做常温冲击试验,V形缺口) C级(作为重要焊接结构) D级(作为重要焊接结构)	A级(不做冲击试验) B、C、D级分别做 20℃、0℃和 -20℃的冲击吸收功 $A_k \geq 27 J$ 。厚度 $< 25 mm$ 的 Q235B 级钢材,如供方能保证冲击吸收功合格,经需方同意,可不做检验;厚度 $> 100 mm$ 的钢材,抗拉强度 $R_m$ 值可降低 20 MPa
Q255	A级 B级(做常温冲击试验,V形缺口)	该牌号已取消
Q275	不分等级,化学成分和力学性能必须保证	分 A、B、C、D 四个质量等级,不同质量等级的多种化学成分和力学性能均需保证,厚度 $> 100 mm$ 的钢材,抗拉强度 $R_m$ 值可降低 20 MPa

3. 优质碳素结构钢(GB/T699—1999)的牌号、临界点、热处理工艺与性能(表 1-45)

表 1-45 优质碳素结构钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

牌号	临界点(℃)					退火		正火		淬火		在以下温度(℃)回火后的硬度 HRC								
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	温度(℃)	HB	温度(℃)	HB	温度(℃)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650
08	732	874	680	854	480	920~940	≤137	920~940	≤137	900~920℃渗碳;780~800℃淬火水冷;150~200℃回火,55~62 HRC	水	≥30	38	33	28	20				
10	724	876	682	850		900~950	≤143	900~950	≤143	900~920℃渗碳;780~820℃淬火水冷;150~200℃回火,55~62 HRC	水	≥35	41	35	29	23				
15	735	863	685	840	440	890~950	≤143	890~950	≤143	900~920℃渗碳;780~820℃淬火水冷;150~200℃回火,55~62 HRC	水	≥44	42	40	30	20	18			
20	735	855	680	835		890~920	≤156	890~920	≤156	900~920℃渗碳;780~800℃淬火水冷;150~200℃回火,56~62 HRC	水	≥30	38	33	28	20				
25	735	840	680	824		870~910	≤175	870~910	≤175		水	≥35	41	35	29	23				
30	732	813	677	796	380	850~900	≤179	850~900	≤179		水	≥44	43	40	30	20	18			
35	724	802	680	774	350	850~890	≤185	850~890	≤185		水	≥50	49	43	35	26	22	20		
40	724	790	680	760	340	840~890	≤207	840~890	≤207		水	≥55	55	48	42	34	29	23	20	
45	724	780	682	751	330	830~880	≤229	830~880	≤229		水	≥59	58	50	41	33	26	22		

(续表)

牌号	临界点(°C)						退火		正火		淬火			在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC							
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	温度(°C)	HB	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650	
50	725	760	690	720	300	810~830	≤207	820~870	≤241	820~850	水	≥59	58	55	50	41	33	26	22		
55	727	774	690	755	290	770~820	≤229	810~850	≤228	800~840	水	≥63	62	56	50	45	34	30	24	21	
60	727	766	690	743	265	770~820	≤229	800~840	≤248	780~830	水	≥63	62	56	52	45	34	30	24	21	
65	727	752	696	730	265	810~860	≤220	820~860	≤241	780~820	水	≥63	63	58	53	45	37	32	28	24	
70	730	743	693	727	270	780~820	≤229	800~840	≤241	780~820	水	≥60	63	61	53	47	39	34	28	24	
75	730	750	690		230	780~800	≤229	800~840	≤285	800	油	55	55	53	50	45	35				
80	725	745	690		230	780~800	≤229	800~840	≤285	780~820	水	≥63	63	61	52	47	39	32	28	24	
85	723	737	695		220	780~800	≤229	800~840	≤302	780~820	水、油	≥63	63	61	55	48	40	34	29	25	
15Mn	735	863	685	840				880~920	≤163	870~900	水、油	≥30		38	35	33	20	17			
20Mn	735	854	682	835	420			900~950	≤167	870~900	水、油	≥38		38	35	33	20	17			
25Mn								870~920	≤207												
30Mn	734	812	675	796	340			900~950	≤217	850~900	油或水	≥45		48	42	36	32	25	19		
35Mn	734	812	675	796	345	830~850	≤197	850~900	≤229	850~880	油或水	≥50				38	32				
40Mn	726	790	689	768		820~860	≤207	850~890	≤229	800~850	油或水	≥48			50	45	38	30	27		
45Mn	726	790	689	768		820~860	≤217	830~860	≤207	810~840	油或水	≥50			50	45	38	30	27		
50Mn	720	760	660	754	320	800~840	≤217	840~870	≤255	800~840	油或水	≥52	55	52	45	38	32	28			
55Mn										780~820	油	≥52	55	52	45	38	32	28			
60Mn	727	765	689	741	270	65Mn	726	765	689	741	270		≤229	820~850	≤269	810	油	≥55	25		
65Mn	726	765	689	741	270		≤229	820~850	≤269	810	油	≥55	61	58	54	47	39	29	25		
70Mn	721	740	670							780~800	油	≥62	62	55	46	37					

三、碳素工具钢(GB1298—1986)的牌号、临界点、性能与热处理工艺(表 1-46)

表 1-46 碳素工具钢的牌号、临界点、热处理工艺与性能

牌号	临界点(°C)				退 火		正 火		淬 火		在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC								
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>cm</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	温度(°C)	HB	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600
T7	725	Ac <sub>3</sub> 765	700		240	730~760	≤187	800~820	229~285	800~830	水、硝	≥60	63	60	54	43	35	31	27
T8	730	750	700		230	730~760	≤187	760~780	201~302	770~820	水、硝	≥60	64	60	55	45	35	31	27
T8Mn	750~780		710~675		180	740~760	≤207	800~820	229~280	760~820	水、硝	≥60	64	60	55	45	35	31	27
T9	740	760	700	695	220	750~780	≤201	800~820	229~280	760~800	水、硝	≥60	64	62	56	46	37	33	27
T10	730	800	700		210	730~770	≤197	800~850	255~321	770~810	水、硝	≥60	64	62	56	46	37	33	27
T11	730	810	700		220	760~790	≤202	820~840	225~310	760~780	水、硝	≥60	64	62	57	47	38	33	28
T12	730	820	700		170	760~780	≤207	850~870	269~341	760~780	淬水入油	≥60	64	62	57	47	38	33	28
T13	730	830	700		130	680~710	≤210	810~830	179~217	760~790 780~810	水 油	≥60	65	62	58	47	38	33	28

四、易切削结构钢(GB/T8731—1988等)的牌号、类型与两种状态下的纵向力学性能(表 1-47)

表 1-47 易切削结构钢的牌号、类型与两种状态下的纵向力学性能

类 别	牌 号	标 准 号	按易切削元素归类	热轧态力学性能				冷拉态力学性能				
				R <sub>m</sub> (MPa)	A <sub>5</sub> (%)	Z (%)	HB	R <sub>m</sub> (MPa)≥	A <sub>5</sub> (%)	HB	钢材尺寸(mm)	
易切削结构钢	Y12	GB/T8731—1988	硫磷系易切削钢	390~540	22	36	170	≥	510~735	490~685	7	152~217
	Y12Pb		铅硫磷系易切削钢	390~540	22	36	170	≥	510~735	490~685	7	152~217
	Y15		硫磷系易切削钢	390~540	22	36	170	≥	510~735	490~685	7	152~217

(续表)

类别	牌号	标准号	按易切削元素归类	热轧态力学性能				冷拉态力学性能					
				$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)	HB	$R_m$ (MPa) $\geq$		$A_5$ (%)	HB		
								钢材尺寸(mm)					
	Y15Pb		铅硫磷系易切削钢	390~540	22	36	170	8~20	>20~30	>30	7	152~217	
	Y20		硫系易切削钢	450~600	20	30	175	530~755	510~735	490~685	7	167~217	
	Y30		硫系易切削钢	510~655	15	25	187	570~785	530~745	510~705	6	174~223	
	Y35		硫系易切削钢	510~655	14	22	187	600~825	560~765	540~735	6	176~220	
	Y40Mn		硫系易切削钢	590~735	14	20	207	625~845	590~785	570~865	6		
	Y45Ca		钙硫系易切削钢	600~745	12	26	241	高温回火态: $R_m$ 590~785 MPa; $A_5$ 17%; 硬度 179~229 HB					
	Y13		硫磷系易切削钢	375~560	22	36	160	695~920	655~855	635~835	6	196~255	
	Y75		硫磷系易切削钢					$\phi < 2.5$ mm: 755~930 $\phi 2.5 \sim 4.5$ mm: 685~885 $> 4.5$ mm: 635~835					
	YT10Pb		铅系易切削钢					直 径					
								$R_m$ (MPa)		$A_{10}$ (%) $\leq$		HV	
				0.6~2.0	930~1030	930~1030	930~1030	甲组	乙组	甲组	乙组	甲组	乙组
				2.1~4.0	835~980	835~980	885~980	乙组	甲组	乙组	甲组	乙组	乙组
				4.1~6.0	735~930	735~930	735~930	4	5	8	8	285~310	275~300
	Y40CrCaS		钙硫系易切削钢					8	8	8	8	265~295	265~295

调质处理(850℃±20℃淬油,500℃±50℃回火,水冷)后的纵向力学性能:  
 $R_m \geq 980$  MPa;  $R_{p0.2} \geq 785$  MPa;  $A_5 \geq 9\%$ ; Z  $\geq 45\%$ ;  $a_k \geq 58.8$  J/cm<sup>2</sup>

易 切 削 结 构 钢

### 五、工程用铸钢的牌号、性能与热处理工艺

1. 一般工程用铸造碳钢(GB/T11352—1989)的新老牌号对照、化学成分、性能与应用(表 1-48)

表 1-48 一般工程用铸造碳钢的新老牌号对照、化学成分、性能与应用

钢 号	化学成分(元素最高含量,质量分数,%)										力学性能 $\geq$					主 要 应 用	
	C	Si	Mn	P、S	残 余 元 素					$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	按合同规定				
					Ni	Cr	Cu	Mo	V				Z (%)	$A_k$ (J)	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> )		
ZG200-400 (ZG15)	0.20	0.50	0.80								200	400	25	40	30	60	用于制造受力不大、要求有韧性的零件,如变速箱体、机座、电磁吸盘等
ZG230-450 (ZG25)	0.30	0.50									230	450	22	32	25	45	用于制造负荷不大、要求有韧性的零件,如机座、机架、阀体、轴承盖、箱体等
ZG270-500 (ZG35)	0.40	0.50	0.90	0.04	0.30	0.35	0.30	0.20	0.05		270	500	18	25	22	35	广泛用于制造飞轮、机架、气缸、轴承座、连杆、曲拐等重要零件
ZG310-570 (ZG45)	0.50										210	570	15	21	15	30	用于制造重负荷零件,如联轴器、大齿轮、轴、气缸体、机架等
ZG340-640 (ZG55)	0.60	0.60									340	640	10	18	10	20	用于制造起重机大齿轮、联轴器、车轮、阀轮、叉头等

注: 1. 对  $a_c$  上限每减少 0.01%, 允许  $a_{Mn}$  增加 0.04%; 对 ZG200-400 锰的最高含量  $a_{Mn}$  1.0%; 其余四个牌号锰的最高含量  $a_{Mn}$  1.20%。  
2. 残余元素总量  $\leq 1.00\%$ , 如需方无要求可不进行分析。

2. 一般工程与结构用低合金钢铸件(GB/T14408—1993)的牌号、性能与热处理工艺(表 1-49)

表 1-49 一般工程与结构用低合金钢铸件的牌号、性能与热处理工艺

牌 号	力学性能 $\geq$					硬度 HB	热 处 理 工 艺
	$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)			
ZG270-480	270	480	18	35			正火+回火;调质
ZG290-510	290	510	16	35	156		正火+回火;调质
ZG345-570	345	570	14	35	217		正火+回火;调质
ZG410-620	410	620	13	35	179~241		正火+回火;调质



(续表)

牌 号	力 学 性 能 $\geq$			硬度 HB	热处理工艺
	$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)		
ZG535 - 720	535	720	12	212~260	正火+回火;调质
ZG650 - 830	650	830	10	220~302	调 质
ZG730 - 910	730	910	8	241~310	调 质
ZG840 - 1030	840	1030	6	262~321	调 质

3. 焊接结构用碳钢铸件(GB/T7659—1987)的牌号、化学成分与性能(表 1-50)

表 1-50 焊接结构用碳钢铸件的牌号、化学成分与性能

牌 号	化学成分(元素最高含量,质量分数,%)										力 学 性 能 $\geq$								
	C	Si	Mn	P,S	Ni	Cr	Cu	残 余 元 素			$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)	$A_k$ (J)	$\alpha_k$ (J/cm <sup>2</sup> )			
								Mo	V	总和									
ZG200 - 400H	0.20		0.80											200	400	25	40	30	59
ZG230 - 450H	0.20	0.50	0.50	0.04	0.30	0.30	0.30	0.15	0.05	0.80	230	450	22	35	25	44	25	44	
ZG275 - 485H	0.25										275	485	20		22	34	22	34	

4. 非标合金铸钢的牌号、热处理工艺与应用(表 1-51)

表 1-51 非标合金铸钢的牌号、热处理工艺、性能与应用

牌 号	热处理工艺	截面尺寸 (mm)	力 学 性 能 $\geq$					HB	主 要 应 用
			$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)	$\alpha_k$ (J/cm <sup>2</sup> )		
ZG40Mn	正火+回火	$\leq 100$	295	640	12	30	163	用于制造承受摩擦和冲击的齿轮等零件	
ZG40Mn2	正火+回火	$\leq 100$	395	590	20	55	179	用于制造承受摩擦和冲击的齿轮等零件	
	调 质		685	835	13	45	269~302		
ZG50Mn2	正火+回火	$\leq 100$	445	785	18	37		用于制造高强度零件,如齿轮、齿轮缘等	

(续表)

牌 号	热处理工艺	截面尺寸 (mm)	力 学 性 能 $\geq$						HB	主 要 应 用	
			$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> )				
							ISO (V)	夏比 (U)			
ZG20SiMn	正火+回火	$\leq 100$	295	510	14	30		39	156	用于制造焊接及流动性良好的零件,如水压缸缸、叶片、喷嘴体、阀弯头等	
	调 质		300	500~650	24		45	150~190			
ZG35SiMn	正火+回火	$\leq 100$	345	570	12	20		24		用于制造承受摩擦的零件	
	调 质		415	640	12	25		27			
ZG35SiMnMo	正火+回火	$\leq 100$	395	640	12	20		24		用于制造负荷较大的零件	
	调 质		490	690	12	25		27			
ZG35CrMnSi	正火+回火	$\leq 100$	345	690	14	30			217	用于制造承受冲击、受磨损的零件,如齿轮、滚轮等	
ZG20MnMo	正火+回火	$\leq 100$	295	490	15			39	156	用于制造受压容器,如泵体等	
ZG5CrMnMo	正火+回火	$\leq 100$	不 规 定								用于制造热锻模具等
ZG40Cr	正火+回火	$\leq 100$	345	630	18	20			212	用于制造高强度齿轮等	
ZG34CrNiMo	调 质	$< 150$	700	950~1000	12			32		240~290	用于制造特别高要求的零件,如吊车行走轮与轴、齿轮、锥齿轮等
		150~250	650	800~950	12			28		220~270	
		250~400	650	800~950	10			20		220~270	
ZG20CrMo	调 质	$\leq 100$	245	460	18	30		24		用于制造齿轮、锥齿轮、高压缸体等零件	
ZG35CrMo	调 质	$\leq 100$	510	740~830	12					用于制造齿轮、齿圈等零件	
ZG42CrMo	调 质	-30	540	740~830	12					220~260	用于制造高负荷零件,如齿轮、锥齿轮等
		30~100	490	690~830	11					200~250	
		100~150	450	690~830	10			16		200~240	
		150~250	400	650~800	10			12		195~240	
		250~400	350	650~800	8			9.6		195~240	
ZG50CrMo	调 质	$\leq 100$	520	740~880	11				220~260	用于制造减速器齿轮、小齿轮等零件	
ZG65Mn	正火+回火	$\leq 100$	不 规 定								用于制造球磨机衬板等零件

## 5. 高锰铸钢(GB/T5680—1998)的牌号、化学成分、热处理后的性能及应用(表 1-52)

表 1-52 高锰铸钢的牌号、化学成分、热处理后的性能及应用

牌 号	化学成分(质量分数, %)						水韧处理后的力学性能 $\geq$				应用对象
	C	Mn	Si	Cr	$\leq$	$P \leq$	$R_m$ (MPa) $\geq$	$A_5$ (%) $\geq$	$A_{KU}$ (J) $\geq$	硬度 HB $\leq$	
ZGMn13-1	1.00~1.45	11.0 ~ 14.0	0.30~1.00	—	0.040	0.090	635	20	—	—	低冲击性能件
ZGMn13-2	0.90~1.35						685	25	147	300	
ZGMn13-3	0.95~1.35		0.035		0.070	735	30	147	结构复杂件		
ZGMn13-4	0.90~1.30					1.50~2.50	20	—			高冲击性能件
ZGMn13-5	0.75~1.30		0.30~1.00		—	0.040	—				

## 6. 非标不锈钢铸钢的牌号、热处理工艺、性能及应用(表 1-53)

表 1-53 非标不锈钢铸钢的牌号、热处理工艺、性能及应用

牌 号	热 处 理 工 艺	力学性能 $\geq$				硬度 HB	主 要 应 用
		$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)		
ZG1Cr12Mo ZG3Cr12Mo	加热至 995℃ 以上温度保温后空冷, 经 550℃ 以上温度回火; 或在 790℃ 以上温度退火	600	485	18	30	$\leq 241$	用于制造水轮机叶片等
ZG1Cr18Ni9Ti	加热至 1100℃ 以上温度保温后水冷, 对于结构复杂薄壁件, 可采取空冷或在 860~880℃ 炉冷或空冷	440	895	25	32		该材料的焊接性能良好, 但钢水的流动性较差, 浇铸时易出现冷隔, 材料有一定的热裂敏感性
ZG0Cr13Ni4Mo	加热至 955℃ 以上温度保温后, 空冷至 95℃ 以下, 在 565~620℃ 温度回火	760	550	15	35	$\geq 241$	用于制造大型水轮机叶片等
ZG0Cr13Ni6Mo	加热至 1000℃ 保温后, 空冷至 400℃ 后炉冷, 在 600~640℃ 第一次回火, 空冷至 300℃ 后炉冷, 再在 570~600℃ 第二次回火后炉冷						用于制造大型水轮机叶片等。该钢的抗大气腐蚀性性能优于 ZG0Cr13Ni4Mo

## 7. 工程结构用中、高强度不锈钢铸钢(GB/T6967—1986)的牌号、性能及应用(表 1-54)

表 1-54 工程结构用中、高强度不锈钢铸钢的牌号、性能及应用

牌 号	力 学 性 能 $\geq$						硬度 HB	主 要 应 用
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)	$A_k$ (J)	$\alpha_k$ (J/cm <sup>2</sup> )		
ZG10Cr13	550	350	15	40			163~229	该材料力学性能较好, 耐大气腐蚀。可用于制造承受冲击负荷且韧性要求较高的零件。能耐有机酸溶液、聚乙烯醇、碳酸氢钠、橡胶液, 可以制造水轮机转轮叶片、水压机阀等
ZG20Cr13	600	400	16	35			170~235	
ZG10Cr13Ni1	600	450	16	35			170~241	

(续表)

牌 号	力 学 性 能 $\geq$						硬度 HB	主 要 应 用
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)	$A_k$ (J)	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> )		
ZG10Cr13Ni1Mo	630	450	16	35			170~241	该类材料综合力学性能高,抗大气腐蚀、水中抗疲劳性能好,焊接性能良好。铸造工艺性能尚好,耐泥沙磨损,可用于铸造大型水轮机转轮叶片
ZG06Cr13Ni4Mo	760	560	15	35	50	60	217~286	
ZG06Cr13Ni5Mo	800	600	15	35	40	50	221~286	
ZG06Cr13Ni6Mo	760	560	15	35	50	60	221~286	

## 8. 一般用途耐热铸钢和合金铸件(GB/T8492—2002)的牌号、力学性能与应用(表 1-55)

表 1-55 耐热铸钢的牌号、力学性能与应用

序号	牌 号	交货状态	力学性能 $\geq$			硬度 HB $\geq$	最高使用温度 (°C)	备 注
			$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A_5$ (%)			
1	ZG30Cr7Si2	800~850°C 进行退火					750	1) 序号 1~6 可以在 800~850°C 进行退火。若需要 ZG30Cr7Si2, 也可铸态下供货。需要热处理时,工艺由供需双方商定 2) 其他均铸态交货,除非合同约定需要热处理
2	ZG40Cr13Si2				8	300	850	
3	ZG40Cr17Si2					300	900	
4	ZG40Cr24Si2					300	1 050	
5	ZG40Cr28Si2					320	1 100	
6	ZGCr29Si2					400	1 100	
7	ZG25Cr18Ni9Si2	铸 态					900	
8	ZG25Cr20Ni14Si2		450	230	15		900	
9	ZG40Cr22Ni10Si2		450	230	10		950	
10	ZG40Cr24Ni24Si2Nb		450	230	8		1 050	
11	ZG40Cr25Ni12Si2		400	220	6		1 050	
12	ZG40Cr25Ni20Si2		450	220	6		1 100	
13	ZG40Cr27Ni4Si2		450	250	3	400	1 100	
14	ZG45Cr20Co20Ni20Mo3W3		400	320	6		1 150	
15	ZG10Ni31Cr20Nb1		400	170	20		1 000	
16	ZG40Ni35Cr17Si2		440	220	6		980	
17	ZG40Ni35Cr26Si2		420	220	6		1 050	
18	ZG40Ni35Cr26Si2Nb1		440	220	4		1 050	
19	ZG40Ni38Cr19Si2		440	220	6		1 050	
20	ZG40Ni38Cr19Si2Ni1		420	220	4		1 100	
21	ZNiCr28Fe17W5Si2Co. 4		400	220	3		1 200	
22	ZNiCr50Nb1Co. 1		540	230	8		1 050	
23	ZNiCr19Fe18Si1Co. 5		440	220	3		1 100	
24	ZNiFe18Cr15Si10. 5		400	200	3		1 100	
25	ZNiCr25Fe20Co15W5Si1Co. 46		480	270	5		1 200	
26	ZCoCr28Fe18Co. 3		有供需双方协商确定					

## 9. 轧辊用铸钢(GB1503—1989)的牌号与性能(表 1-56)

表 1-56 轧辊用铸钢的牌号与性能

分 类	牌 号	力 学 性 能 $\geq$						硬 度 HRC	
		$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> )	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$a_{kU}$ (J/cm <sup>2</sup> )	辊 身	辊 颈 $\leq$
		附 铸 试 样			梅 花 试 样				
优质碳素钢	ZU70				640	7	14.3	32~42	42
	ZU70Mn				740	6	12	32~42	42
	ZU80				710	6	9.8	34~44	44
合金钢	ZU60CrMnMo				740	6	14.3	32~42	42
	ZU65CrNiMo	650	6	9.8				35~45	45
	ZU70Mn2				740	6	9.8	34~44	44
	ZU70Mn2Mo				770	6	9.8	36~46	46
	ZU75CrMo	680	6	8.0	770	6	9.8	36~46	46
	ZU75CrMnMo	700	6	9.8				35~45	45
	ZU80Cr				790	6	9.8	38~48	48
半 钢	ZU140CrMo	490			590			38~48	48
	ZU140CrNiMo	490			590			35~45	45
	ZU160CrMo	392			540			40~50	50
	ZU160CrNiMo	392			540			38~48	48
石墨钢	ZUS140SiCrMo	540			660			36~46	46
	ZUS150SiCrMo	500			600			40~50	50

### 第三节 合金结构钢的牌号、性能、 临界点与热处理工艺

#### 一、合金钢的分类

按照钢中合金元素的含量(质量分数,%)不同,合金钢的分类见表 1-57。

表 1-57 合金钢按钢的合金含量分类

合 金 钢 分 类	低合金钢	中合金钢	高合金钢
合金元素含量(质量分数,%)	<5	5~10	>10



(续表)

牌号	临界点(°C)						退火		正火		淬火				在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC							
	A <sub>c1</sub>	A <sub>c3</sub>	A <sub>n1</sub>	A <sub>r3</sub>	M <sub>s</sub>	温度(°C)	HB	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650		
40MnVB	740	785	645	720		850~880	≤207	860~900		830~870	油	≥45				34	31	30	27	22		
20MnTiB	720	843	625	795				890~910	≤149	860~890	油	≥35		45	44	41	40	38				
25MnTiBRE	708	870	605	705	391			950		渗碳降温淬油 840~870		≥58	58~64									
15Cr	766	838	702	799		860~890	≤179	870~900	≤270	渗碳—淬水 780~800		≥58	58~63									
15CrA	735	870						880~900	143~197	渗碳—淬水 780~800		≥58	58~63									
20Cr	766	838	702	799	380	860~890	≤179	870~900	≤270	渗碳—淬油 770~820		≥58	58~64									
30Cr	740	815	670		350	830~850	≤187	850~870	≤300	840~860	油或水	≥50										
40Cr	743	782	693	730	355	825~845	≤207	850~870	≤250	830~860	油	≥55	55	53	51	43	34	32	28	24		
45Cr	721	770	660	693	310	840~850	≤207	830~850	≤300	820~840	油	≥55	55	53	49	45	33	31	29	24		
50Cr	721	771	660	692	250	830~850	≤229			820~840	油	≥55	56	55	50	45	38	35	31	28		
38CrSi	763	810	680	755	330	860~880	≤229	900~920		900~920	油	≥47		58	55	48	40	33	30	25		
12CrMo	720	880	695	790	325				≤159	900	空气											
15CrMo	745	845			435			910~940		渗碳、淬油、水 820~850		≥58	58~63									
20CrMo	743	818	504	746	400	850~870		880~920		渗碳、淬油、水 810~830		≥58	58~64									
30CrMo	757	807	693	763	345	830~850	≤229	870~900	≤400	850~880	油或水	≥45	54	51	47	38	31	28	25			
30CrMoA	745	790			350	830~850	≤229	870~900	≤400	850~880	油或水	≥45						37		17		
35CrMo	755	800	695	750	271	820~840	≤241	830~860	≤400	830~860	油	≥48	55	53	50	43	34	32	28	24		
42CrMo	730	800			310			850~880		830~850	油	≥50	56	54	51	45	38	35	29	25		
12CrMoV	820	945							123~167	970	空气											
35CrMoV	755	835	600			860~880	≤229	880~920		900~920	油	≥45		50	46	43	40	37	32	25		

(续表)

牌号	临界点(°C)					退火		正火		淬火			在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC								
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	温度(°C)	HB	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650	
12Cr1MoV	774 ~ 803	882 ~ 914			400 ~ 430			970	143~179	970	空气										
25Cr2MoV	760	840	680 ~ 690	760 ~ 780		930~950		930~950		930~950	油	45~48						620~650°C, 28~33			
25Cr2MoVA	760	855	680 ~ 690	760 ~ 780				900		900	油										
38CrMoAl	760	885	675	740	360	900~920	≤229	930~970	≤229	930~970	油或水	≥52		52	47	41	38				600~680°C回火, 241~321HB
40CrV	755	790	700	745	218	830~850	≤241	850~880	≤241	850~880	油	≥48		53	50	45	39	33	30		
50CrVA	752	788	688	746	270	810~870		850~880		850~880	油	≥52		56	55	51	45	39	31	28	
15CrMn	750	845			400	850~870	≤179	850~880	≤179	850~880	油或水	≥35									
20CrMn	765	838	700	798		850~870	≤187	870~900	≤187	870~900	油或水	≥40		38							
40CrMn	730	780			350	820~840	≤229	850~870	≤229	850~870	油	≥50		52	46	41	33	29	26		
20CrMnSi	755	840	690			860~870	≤207	870~900	≤207	870~900	油或水	≥40		45	43	40	35	30	26		
25CrMnSi	760	880	680		305	840~860	≤217	860~880	≤217	860~880	油	≥42		48	45	41	36	32	29		
30CrMnSi	760	830	670	705	355	840~860	≤217	860~880	≤217	860~880	油	≥45		50	47	42	38	35	32		
30CrMnSiA	780	855			352			860~880		860~880	油	≥48		48		45	35		25		
20CrMnMo	710	830	620	740				850~870		850~870	渗碳—淬油 810~830	≥58		58~63							
40CrMnMo	735	780	680			840~850	≤241		≤241	840~850	油	54~59						630~650°C, 30~35			
20CrMnTi	715	843	625	795	350			950~970		950~970	油	≥35		41	40	39	36	27	26	21	
30CrMnTi	765	790	660	740				950~970		950~970	油	≥40			45	41	37	31	28		



(续表)

牌号	临界点(°C)					退火		正火		淬火			在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC								
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	温度(°C)	HB	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650	
20CrNi	733	804	666	790		860~890		860~890		840~880	油	≥40									
40CrNi	731	769	660	702		820~850	≤207	870~890		820~840	油	≥53	53	50	47	42	37	33	29	21	
45CrNi	725	775	680							810~830	油	≥55	55	52	48	41	35	30	25		
50CrNi	735	750	657	690		820~900	≤207	870~900		820~840	油	≥30		48	47	40	33	29	25	20	
12CrNi2	732	794	671	763				880~920	≤207	渗碳—淬油 770~800		≥58	≥58								
12CrNi3	710	810	660	715	409			850~940		渗碳—淬油 770~800		≥58	≥58								
20CrNi3	700	760	500	630				850~880		820~860	油	≥45		46	41	37	33	31	25		
30CrNi3	699	749	621	649		810~830	≤241	840~860		820~860	油	≥48		51	45	41	35	32	28	23	
37CrNi3	710	770	640		310					830~850	油	≥50		52	47	43	38	35	31		
12Cr2Ni4	720	800	605	660	390			800~850		渗碳—淬油 770~800		≥60	≥60								
20Cr2Ni4	705	765	580	640	385			900~940		渗碳—淬油 770~820		≥60	≥60								
20CrNiMo	725	810			396			880~920	143~196	渗碳—淬油 780~820		≥60	≥60								
40CrNiMoA	760	790		680	308	880~900	≤229	890~920		840~860	油	≥48		52	47	43	38	35	29		
18CrNiMnMoA	700	810	350							850~900	油	≥40		40	41	40	38	34	27		
45CrNiMoVA	740	770	650		250	880~900	≤269			860	油										
18Cr2Ni4WA	700	810	350	400	310					840~900	空或油	≥45	42	41	40	39	34	28	24	22	
25Cr2Ni4WA	700	720	300		180~200			950		860~890	空或油	≥48	48	47	42	39	37	31	27	25	

### 三、低合金结构钢的牌号与性能

低合金结构钢(GB1591—1994)的牌号与性能见表 1-59。

表 1-59 低合金结构钢的牌号与性能

牌号	质量等级	屈服强度(MPa)				$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	纵向 $A_k$ (J)				180°弯曲试验	
		厚度(直径、边长, mm)						+20℃	0℃	-20℃	-40℃	$d$ —弯心直径 $a$ —试样厚度(直径)	
		≤16	>16 ~35	>35 ~50	>50 ~100								
≥				≥		≤16	>16~35						
Q295	A B	295	275	255	235	390~570	23	34				$d = 2a$	$d = 3a$
Q345	A B C D E	345	325	295	275	470~630	21 21 22 22 22	34	34	34	27	$d = 2a$	$d = 3a$
Q390	A B C D E	390	370	350	330	490~650	19 19 20 20 20	34	34	34	27	$d = 2a$	$d = 3a$
Q420	A B C D E	420	400	380	360	520~680	18 18 19 19 19	34	34	34	27	$d = 2a$	$d = 3a$
Q460	C D E	460	440	420	400	550~720	17		34	34	27	$d = 2a$	$d = 3a$

### 四、弹簧钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

1. 弹簧钢(GB1222—1984)供货应满足的力学性能(表 1-60)

表 1-60 弹簧钢供货应满足的力学性能

牌 号	热 处 理 制 度			力 学 性 能 ≥				
	淬火温度 (℃)	淬火介质	回火温度 (℃)	屈服强度 (MPa)	$R_m$ (MPa)	断后伸长率(%)		$Z$ (%)
						$A_5$	$A_{10}$	
65	840	油	500	784	980		9	35
70	830	油	480	833	1 029		8	30
85	820	油	480	980	1 127		6	30
65Mn	830	油	540	784	980		8	30
55SiMn	870	油	480	1 176	1 274		6	30
55Si2MnB	870	油	480	1 176	1 274		6	30
55SiMnVB	860	油	460	1 225	1 372		5	30
60Si2Mn	870	油	480	1 176	1 274		5	25
60Si2MnA	870	油	440	1 372	1 568		5	20
60Si2CrA	870	油	420	1 568	1 764	6		20
60Si2CrA	850	油	410	1 666	1 862	6		20
55CrMnA	830~860	油	460~510	1 078( $R_{p0.2}$ )	1 225	9		20
60CrMnA	830~860	油	460~520	1 078( $R_{p0.2}$ )	1 225	9		20
50CrVA	850	油	500	1 127	1 274	10		40
60CrMnBA	830~860	油	460~520	1 078( $R_{p0.2}$ )	1 225	9		20
30W4Cr2V	1 050~1 100	油	600	1 323	1 470	7		40

## 2. 弹簧钢的牌号、临界点、热处理工艺与性能(表 1-61)

表 1-61 弹簧钢的牌号、临界点、热处理工艺与性能

牌 号	临界点(°C)					退 火			正 火			淬 火			不同温度(°C)回火后的硬度 HRC						常用回火温度(°C)	冷却介质	硬度 HRC
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	A <sub>r1</sub>	A <sub>r3</sub>	Ms	温度(°C)	冷却方式	HB	温度(°C)	冷却方式	HB	温度(°C)	介质	HRC	300	400	500	550	600	650			
65	727	752	696	730	265	810~860	缓冷	≤220	820~860	空冷	≤241	780~820	水	≥63							320~420	水	35~48
70	730	743	693	727	270	780~820	缓冷	≤229	800~840	空冷	≤241	780~820	水	≥60							380~400	水	45~50
80	725	Ac <sub>cm</sub> 745	690		230	780~800	缓冷	≤229	800~840		≤285	780~820	水	≥63							375~400	水	40~49
65Mn	726	765	689	741	270	820~870	缓冷	≤229	820~850	空冷	≤269	810	油	≥55							350~530	空气	36~50
50CrVA	752	788	688	746	270~320	810~870	缓冷		850~880	空冷	830~860		油	≥52							370~450	水	45~50
55Si2MnB	755~770	806~830	690	745	289								油								400~450		≤415 HBS
55SiMnVB	750	775	670	700		800~840	炉冷		840~880	空冷		870	油	≥60	58	52	45	40	38	35	400	空气	47~50
60Si2Mn	755	810	700	770	305	830~860	炉冷	≤222	830~860	空冷	≤302	870	油	>61	56	51	45	39	34		430~480	水、空气	45~50
60Si2CrA	765	780	700	670					850~870	空冷		850~860	油	62~66							450~480	水	45~50
55CrMnA	750	775	690		250	800~820	炉冷	≤272	800~840	空冷		840~860	油	62~66	55	50	44	38			400~500	水	42~50
60CrMnMoA	700	805	655		210				820~840	空冷		860	油	≥60	63~59	52~47		38~30	29~24				
30W4Cr2V	820				400	740~780	炉冷					1050~1100	油	52~58				52	43		520~540	水、空气	43~47

## 五、轴承钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

轴承用钢分为四类：高碳铬轴承钢(GB/T18254—2002)、高碳铬不锈钢轴承钢(YB/T096—1997)、渗碳轴承钢(GB/T3203—1982)、无铬轴承钢。各种轴承钢的牌号、临界点、热处理工艺与性能见表1-62。

表1-62 各种轴承钢的牌号、临界点、热处理工艺与性能

种类	牌号	临界点(°C)					退火			淬火			回火	
		Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	温度(°C)	HRC	
高碳铬 轴承钢	GCr4						≤217							
	GCr15	745	Ac <sub>cm</sub> 900	700		240	790~810	170~207	835~850	油	≥63	150~170	61~65	
	GCr15SiMn	770	Ac <sub>cm</sub> 872	708		210	790~810	179~207	820~840	油	≥63	150~170	61~65	
	GCr15SiMo						790~810	≤217	830~850	油	≥63	150~170	61~65	
	GCr18Mo						850~870	≤217		油	≥63	150~170	61~65	
高碳铬 不锈钢	95Cr18	815~865	—	765~665		145	850~870	207~255	1 000~1 050	油、空	>59	160~200	≥58	
	102Cr17Mo	815~865	—	765~665		145	850~870	≤225	1 050~1 100	油	≥59	150	≥58	
渗碳轴 承钢	G20CrMo	743	818	504	746	140		≤217		油	≥63	150~170	61~65	
	G20CrNiMo	725	810			396		≤217		油	≥63	150~170	61~65	
	G20CrNi2Mo							≤217			≥63	150~170	61~65	
	G20Cr2Ni4	685	775	585	630	305	940°C 渗碳		780	油	≥62	150	62	
	G10CrNi3Mo							≤217		油	≥63	150	62~63	
	G20Cr2Mn2Mo	725	835	615	700	310	940°C 渗碳		800~820	油	≥62	150~170	61~65	
	GSiMnV	755	Ac <sub>cm</sub> 780	680	705			760~790	179~207	780~810	油	≥62	160	62~63
无铬轴 承钢	GSiMnVRE	745	Ac <sub>cm</sub> 785	680	730	125	770~790	179~207	770~810	油	≥62	160	62~63	
	GSiMnMoV	740	Ac <sub>cm</sub> 800	681	727		760~790	≤217	770~800	油	≥58	160	61~65	
	GSiMnMoVRE	740	Ac <sub>cm</sub> 800	681	727		770	204	800~840	油	63.1 62.8	160	≥62	
	GMnMoV	743	Ac <sub>cm</sub> 873	677	698		770~790	≤217	770~810	油	≥63	150	62~63	
	GMnMoVRE	742	Ac <sub>cm</sub> 887	682	702		780	203	805	油	≥62	150	62~63	

## 六、非调质机械结构钢的牌号与性能

非调质机械结构钢(GB/T15712—1995)是在中碳钢中添加微量合金元素(V、Ti、Nb、N等),通过控温轧制(锻制)、控温冷却,在铁素体和珠光体中析出碳(氮)化合物为强化相,使之在轧制(锻制)后不经调质处理即可获得碳素结构钢或合金结构钢经调质处理后所达到的力学性能的钢种,其牌号与性能见表1-63。非调质机械结构钢的最新发展已出现高碳非调质钢。

表 1-63 非调质机械结构钢的牌号与性能

非调质钢的规格与用途	牌 号	力 学 性 能 $\geq$					硬度 HB $\geq$
		$R_m$ (MPa)	屈服强度(MPa)	$A_5$ (%)	Z(%)	$A_k$ (J)	
直径或边长不大于40 mm的易切削非调质机械结构钢	YF35V	590	390	18	40	47	229
	YF40V	640	420	16	35	37	255
	YF45V	385	440	15	30	35	257
	YF35MnV	735	460	17	35	37	257
	YF40MnV	785	490	15	33	32	275
	YF45MnV	835	510	13	28	28	285
直径或边长大于40 mm不大于60 mm的易切削非调质机械结构钢	YF35MnV	710	440	15	33	35	257
	YF40MnV	760	470	13	30	28	265
	YF45MnV	810	490	12	28	25	275
热锻用非调质机械结构钢	F45V	685	440	15	40	32	257
	F35MnVN	785	490	15	40	39	269
	F40MnV	785	490	15	40	36	275

## 第四节 合金工具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

### 一、高速工具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

高速工具钢(GB/T9943—1988)的牌号、临界点、性能与热处理工艺见表1-64。

### 二、冷作模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

(1) 冷作模具钢(GB/T1299—2000)的牌号、临界点、性能与热处理工艺见表1-65。

(2) 非标冷作模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺见表1-66。

### 三、热作模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

(1) 热作模具钢(GB/T1299—2000)的牌号、临界点、性能与热处理工艺见表1-67。

(2) 部分非标热作模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺见表1-68。

### 四、塑料模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

塑料模具钢(GB/T1299—2000)的牌号、临界点、性能与热处理工艺见表1-69。

### 五、量具刃具用钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

量具刃具用钢(GB/T1299—2000)的牌号、临界点、性能与热处理工艺见表1-70。

### 六、耐冲击工具用钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

耐冲击工具用钢(GB/T1299—2000)的牌号、临界点、性能与热处理工艺见表1-71。

表 1-64 高速工具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

牌 号	临界点(°C)				交货硬度 HB <sub>W</sub>		热 处 理 工 艺						回火后 硬度 HRC <sub>2</sub>	
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>cm</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ms	退火态	其他 加工 方法 <sup>①</sup>	预 热		淬 火 加 热		淬火 介质 <sup>②</sup>	回火温度(°C)/ 时间(h)/ 次数		
							温度 (°C)	时间 (s/mm)	介 质	温 度 (°C)				时 间 (s/mm)
W18Cr4V	820	860	760	210	255	269	850	25	中性盐浴	1 260~1 280 1 200~1 240	10~15	油	560 / 1 / 3	62 60
W18Cr4VCo5	842~872				269	285	850	25	中性盐浴	1 270~1 290	10~15	油	560 / 1 / 3	62
W18Cr4VCo8	842~885				285	302	850	25	中性盐浴	1 270~1 290	10~15	油	560 / 1 / 3	62
W12Cr4V5Co5	841~873		740	220	277	293	800~850	25	中性盐浴	1 220~1 245	10~15	油	530~560 / 1 / 3	65
W6Mo5Cr4V2	835	885	770	225	255	262	850	25	中性盐浴	1 150~1 200 1 200~1 220 1 230 1 240	10~15	油	560 / 1 / 3	60 62 63 64
CW6Mo5Cr4V2					255	269	850	25	中性盐浴	1 190~1 210	10~15	油	560 / 1 / 3	65
W6Mo5Cr4V3	835~860			140	255	269	850	25	中性盐浴	1 200~1 230	10~15	油	550~570 / 1 / 3	64
CW6Mo5Cr4V3	835~860			140	255	269								
W2Mo9Cr4V2	835~860			140	255	269	800~850	25	中性盐浴	1 180~1 210 1 210~1 230	10~15	油	550~580 / 1 / 3	65
W6Mo5Cr4V2Co5	825~851			220	269	285	800~850	25	中性盐浴	1 210~1 230	10~15	油	550~580 / 1 / 3	64
W7Mo4Cr4V2Co5					269	285	800~850	25	中性盐浴	1 180~1 200	10~15	油	550~580 / 1 / 3	66
W2Mo9Cr4VCo8	841~873		740		269	285	850	25	中性盐浴	1 180~1 200 1 200~1 220	10~15	油	550~570 / 1 / 4	66 66
W9Mo3Cr4V					255	269	850	25	中性盐浴	1 210~1 250	10~15	油	560 / 1 / 3	62
W6Mo5Cr4V2Al	835	885	770		269	285	850	25	中性盐浴	1 220~1 240	10~15	油	550~570 / 1 / 4	65

注: ① 连轧、锻制、冷拉钢棒以退火状态交货,或连轧、锻制钢棒退火后再经其他加工方法(剥皮、轻拉、磨光或抛光等)加工后交货。  
② 实际生产中,高速钢件的淬火介质有油、空气、盐浴等,根据具体高速钢件的结构、组织、性能要求以及具体热处理生产条件选择。

表 1-65 冷作模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

牌 号	临界点 (°C)					退 火		淬 火			在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC							
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>cm</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	温度(°C)	HB	温度(°C)	介 质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650
Cr12	810	835	755	770	180	870~900	207~255	980~1000	油	63~64	63	61	57	55	53	49	44	39
Cr12Mo1V1								980~1020	油、空	≥62								
Cr12MoV	830	855	750	785	230	870~900	217~256	980~1050	油、空	≥63	63	60	59	57	55	53	47	40
Cr5Mo1V	785~835		750~705		180	845~870	201~229	925~980	空、油	≥62	64	63	58	57	56	55	50	
9Mn2V	736	765	655	690	125	740~755	≤212	790~815	油	≥62	60	59	55	48	40	36	32	27
CrWMn	750	940	710		200~210	770~790	197~227	820~840	油	63~65	64	62	58	63	47	43	39	35
9CrWMn	750	900	700		205	770~790	187~228	820~840	油	64~66	62	60	58	52	45	40	35	
Cr4W2MoV	795	900	760		142	805~870	240~255	980~1040	油、硝	≥62	65	63	61	59	58	55		
6Cr4W3Mo2VNb (65Nb)	810~830		720~740		220	850~870	≤217	1080~1180	油、空	≥61		61	58	59	60	61	56	
6W6Mo5Cr4V	820	730			240			1180~1200	油	≥60					61	62	59	

表 1-66 部分非标准冷作模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

牌 号	临界点 (°C)						退 火		淬 火			在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC						
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub> Ac <sub>cm</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	温度(°C)	HB	温度(°C)	介 质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650
9Cr6W3MoV2(GM)						球化 860	~227	1100~1160	油或分级	≥60								520~540°C三次 ≥64
Cr8MoWV3Si(ER5)						860	220~240	1130~1150	油	≥63					63~64	63~65	57~59	47~49
7Cr7Mo2V2Si (LD)						球化 860	187~206	1100~1150	油或分级	≥60				58~60	61~62	61~62	58	
6CrNiSiMnMoV (GD)	705~740		605~580		~172	球化 770	230~240	870~930	油	≥64	62~64	59~61	59~58	56~57				
7CrSiMnMoV (CH-1)						球化 850	217~240	900~920	油或分级	≥60		≥58						

表 1-67 热作模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

牌 号	临界点 (°C)					退 火		淬 火		在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC								
	A <sub>c1</sub>	A <sub>c3</sub>	A <sub>n1</sub>	A <sub>r3</sub>	M <sub>s</sub>	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650
5CrMnMo	710	760	650		220		197~241	820~850	油	≥50	58	57	52	47	41	37	34	30
5CrNiMo	730	780	610	640	230		≤241	830~860	油	≥50	59	58	53	48	42	38	35	31
3Cr2W8V	800	850	690	750	380	860~900	205~235	1 050~1 100	油 硝	≥45	52 54	51 53	50 52	49 51	48 49	49 53	45 50	40 45
5Cr4Mo3SiMnVAI	837	902			277	840~860	≤220	1 090~1 120	油	≥60		57.5 58	58	59	60 61	58 61	52 56	41 45
3Cr3Mo3W2V	850	930	735	825	400			1 060~1 130	油	55~59			56~ 58		56~ 57		53	
5Cr4W5Mo2V								1 130~1 140	油	58~59							56	48
8Cr3	785	830	750	770	370	790~810	207~255	820~830	油	60~63	62	60	58	55	50	43	39	
4CrMnSiMoV	792	855	660	770	325			860~880	油	56~58			50	50	47	45	43	38
4Cr3Mo3SiV						860~880	197~241	1 030~1 080	油 空	52~56						51	48	
4Cr5MoSiV	835	912	720	773	~310	845~900	192~235	1 010~1 040	油或分级	56~58	58	55	53	53	54	53	50	45
4Cr5MoSiV1	860	915	775	815	340	860~890	≤229	1 020~1 050	油或分级	56~58	55	52	51	51	52	53	45	35
4Cr5W2VSi	800	875	730	840	275	860~880	≤241	1 060~1 080	油 空	56~58	57	56	56	56	57	55	52	43

表 1-68 部分非标准热作模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

牌 号	临界点 (°C)					退 火		淬 火		在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC								
	A <sub>c1</sub>	A <sub>c3</sub>	A <sub>n1</sub>	A <sub>r3</sub>	M <sub>s</sub>	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650
3Cr2MoWVNi						等温 820	220~240	980~1 020	油									610~660°C, 41~43
5Cr2NiMoVSi						等温 800	220~230	970~1 000	油									610~630°C, 45~47
4Cr3Mo3W4VNi (GR)	821	880	752	850	204	等温 850	220~230	1 160~1 200										630°C, 50~54



(续表)

牌 号	临界点 (°C)						退 火			淬 火			在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC					
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650
6Cr4Mo3Ni2WV (CG2)	737	822	630~ 670		180	等温 820	220~230	1 110~1 150	油	≥58						59~ 61		50~ 53
4Cr3Mo2NiVNbB (HD)						850	220~230	1 130	油	≥53			54	54	53	53	49	47
3Cr3Mo3VNb (HM3)	836~ 948		771~ 923		~390	球化 940	229	1 060~1 090	油	≥47				48.5	48.5	49	48	39
4Cr3Mo2MnVB (ER8)	801	874	680	759	~342	等温 840		1 000~1 070	油	≥52					50~ 51		41~ 43	41~ 43
4Cr3Mo2MnSiVNbB (Y4)	789	910			~363	等温 850	170~181	1 050~1 100	油	≥56							600°C, 52 680°C, 49	
4Cr5Mo2MnVSi (Y10)	815	893			~271	等温 850	170~187	950~1 050	油	≥50						51	45	40

表 1-69 塑料模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

牌 号	临界点 (°C)						退 火			淬 火			在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC					
	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ms	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650
3Cr2Mo									油	50~54								540~580°C, 30~35
3Cr2MnNiMo																		
非标塑料模具钢																		
8Cr2MnWMoVS (8Cr2S)	770	820	660	710	~170			860~920	油 空	62~64								650°C, 30~34
4CrNiMnMoVSCa (4NiSCa)	695~ 735		378~ 305		~220	等温 770	≤230	840~900	油	≥50		54	52	46.5	45	43	40.5	33.5
PMS (低碳镍铝铁合金钢)	675	821	382	517	~270			固溶 870	空冷	31~33					40~ 43			620°C时效, 35~40
Y55CrNiMnMoVS (SM1)	712~ 772				~290	等温 810	≤200	800~850	油	≥57								635°C火, 40
SM2	710	795			~405			固溶 900	空冷	42~45								510°C时效, 40

注: 8Cr2S、4NiSCa 为华中理工大学研发, PMS 为上海材料研究所研发, SM1、SM2 为上海钢铁研究所研发。



## 七、无磁模具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺

无磁模具钢(GB/T1299—2000)的牌号、性能与热处理工艺见表 1-72。

表 1-72 无磁模具钢的牌号、性能与热处理工艺

牌 号	退 火		固 溶			在以下温度(°C)回火后的硬度 HRC							
	温度(°C)	HB	温度(°C)	介质	HRC	150	200	300	400	500	550	600	650
7Mn15Cr2Al3V2WMo	870~890	—	1 170~1 190	水									45

## 八、部分美国工具钢的淬火回火参考工艺规范

部分美国工具钢的淬火回火参考工艺规范见表 1-73。

表 1-73 部分美国工具钢的淬火一回火参考工艺规范

类 别	牌 号	淬 火			常用回火 温度(°C)
		预热温度(°C)	淬火温度(°C)	淬火介质	
铬热作 模具钢	H10	815	1 010~1 040	空 冷	540~650
	H11、H12	815	900~1 020	空 冷	540~650
	H13	815	995~1 040	空 冷	540~650
	H14	815	1 010~1 070	空 冷	540~650
	H19	815	1 090~1 200	油淬、空冷	540~700
钨热作 模具钢	H21	815	1 090~1 200	油 淬	595~675
	H23	845	1 200~1 250	油 淬	650~815
	H24	815	1 090~1 230	油淬、空冷	565~650
	H25	815	1 150~1 250	空 冷	565~675
	H26	870	1 180~1 260	油淬、空冷、盐浴淬	540~675
钼 热 作 钢	H41、H43	730~845	1 090~1 190	油淬、空冷、盐浴淬	565~650
	H42	730~845	1 120~1 220	油淬、空冷、盐浴淬	565~650
高碳高铬 热作钢	D1、D5	815	980~1 020	空 冷	205~540
	D3	815	925~980	油 冷	205~540
	D4	815	970~1 010	空 冷	205~540
	D7	815	1 010~1 070	空 冷	150~540
中合金空冷 淬火冷作钢	A2	790	925~980	空 冷	175~540
	A3	790	955~980	空 冷	175~450
	A4	675	815~870	空 冷	175~425
	A6	650	830~870	空 冷	150~425
	A7	815	955~980	空 冷	150~540
	A8	790	980~1 010	空 冷	175~595
	A9	790	980~1 020	空 冷	510~620
	A10	650	790~815	空 冷	175~425

(续表)

类别	牌号	淬 火			常用回火 温度(°C)
		预热温度(°C)	淬火温度(°C)	淬火介质	
冷作 工具钢	01	650	790~815	油 淬	175~260
	02	650	760~800	油 淬	175~260
	06	650	790~815	油 淬	175~315
	07	650	790~830 845~885	油 淬 水 淬	175~290
抗震钢	S1	650	900~955	油 淬	205~650
	S2	650	845~900	水淬火盐水淬	175~425
	S5	760	870~925	油 淬	175~425
	S7	650~705	925~955	空冷、油淬	205~620

### 九、部分美国高速钢的淬火回火参考工艺规范

部分美国高速钢的淬火回火参考工艺规范见表 1-74。

表 1-74 部分美国高速钢的淬火回火参考工艺规范

类型	钢 号	淬 火			回 火		
		预热温度(°C)	淬火温度(°C)	淬火介质	温度(°C)	次数	时间(h)
钨高 速钢	M1、M7、M10	730~845	1 177~1 219	油淬、空冷或盐浴	540~595	2	1
	M2	730~845	1 190~1 230	油淬、空冷或盐浴	540~595	2	1
	M3、M4 M30、M34、M40	730~845	1 200~1 220	油淬、空冷或盐浴	540~595	2	1
	M6	790	1 150~1 200	油淬、空冷或盐浴	540~595	2	1
	M36	730~845	1 220~1 250	油淬、空冷或盐浴	540~595	2	1
	M41	730~845	1 200	油淬、空冷或盐浴	540~595	2	1
	M42	730~845	1 190~1 220	油淬、空冷或盐浴	540~595	3	1
	M43	730~845	1 190~1 230	油淬、空冷或盐浴	540~595	3	1
	M44	730~845	1 200~1 230	油淬、空冷或盐浴	540~625	3	1
	M46	730~845	1 190~1 210	油淬、空冷或盐浴	525~565	3	1
	M47	730~845	1 180~1 200	油淬、空冷或盐浴	525~595	3	1
钨高 速钢	T1、T2、T4、T8	815~870	1 260~1 300	油淬、空冷或盐浴	540~595	2	1
	T5、T6	815~870	1 270~1 300	油淬、空冷或盐浴	540~595	2	1
	T15	815~870	1 200~1 260	油淬、空冷或盐浴	540~650	3	1

## 第五节 特殊性能钢的牌号、性能与热处理工艺

### 一、不锈钢的性能与热处理工艺

不锈钢是  $\omega_{Cr}$  至少为 10.5%、 $\omega_C$  最大不超过 1.2% 的钢,以不锈、耐蚀性为主要特性,是不锈钢和耐酸钢的总称。不锈钢是指在空气、水、盐的水溶液、某些酸以及弱腐蚀介质中具有抗腐蚀能力的钢种,在强烈腐蚀介质中仍有抗腐蚀能力的不锈钢有时可称为耐酸钢。不锈钢可以通过热处理,改变钢的组织结构和应力状态来获得所需的力学性能、工艺性能和提高抗腐蚀性的能力。

不锈钢按其空冷组织状态的分类见表 1-75。

表 1-75 不锈钢按空冷组织状态的分类

不锈钢类型	成分与组织特征	热处理特征
奥氏体型	以铬、镍为主要合金元素,另外加入钼铜以提高在稀硫酸、磷酸和尿素中的耐蚀性;锰氮在钢中用以代替部分的镍。钢 Ms 点低于室温,淬火或正火后基体组织为奥氏体,有时还有少量的 $\delta$ 铁素体	这类钢不能通过淬火进行强化。固溶热处理制度及力学性能见表 1-76 加热时要防止表面增碳,否则会加大晶间腐蚀倾向。对于含 Ti、Nb 的 18-8 钢一般在固溶处理后还需进行稳定化处理,即将钢加热到 850~880℃ 保温,使铬的碳化物完全溶解(TiC、NbC 不完全溶解,且在冷却过程中充分析出),使碳不可能再形成铬的碳化物,从而有效地消除晶间腐蚀
铁素体型	是单相的铁素体组织,抗氧化性强,在各种腐蚀介质中有较高的耐蚀性	在加热和冷却时不发生相变,其热处理比较简单,一般只进行退火处理。常见的热处理制度及力学性能见表 1-77 该类钢在 400~525℃ 范围内停留会造成 475℃ 脆性,在 550~700℃ 长期加热时有 $\sigma$ -相析出使钢变脆。如果产生这种情况,可采用加热到 475℃ 以上然后快速冷却的办法加以消除
奥氏体-铁素体型	是双相不锈钢,抗晶间腐蚀的能力优于单相的奥氏体不锈钢,但热加工性能低于单相的奥氏体不锈钢,原因是奥氏体与铁素体对畸变的抗力不同,且再结晶速度也不同,致使在变形过程中出现内应力而导致产生微裂纹	这类钢的热处理为固溶处理,奥氏体-铁素体不锈钢加热时同样要防止表面增碳,否则晶间腐蚀倾向会加大。其热处理制度及力学性能见表 1-78
马氏体型	马氏体不锈钢淬透性良好,在空冷的条件下也能得到马氏体组织	通过淬火+回火强化。该类钢锻造后需经退火处理,以消除相变应力、降低硬度、提高塑性和韧性。该类钢在低温区域的导热性差,快速加热易引起零件畸变或产生裂纹。淬火加热时要控制加热速度。该类钢中含有较多难溶的铬碳化物( $Cr_{23}C_6$ 及 $Cr_7C_3$ ),淬火温度要比相变点高得多,以便使这些铬碳化物能溶入奥氏体并均匀化。淬火温度过高或过低对力学性能及耐蚀性均有不利的影响。该类钢退火热处理制度及硬度见表 1-79,淬回火热处理制度及力学性能见表 1-80
沉淀硬化型	沉淀硬化不锈钢不是通过淬火来强化,而是通过固溶处理+时效处理从马氏体或奥氏体基体上沉淀析出金属间化合物、富铜相、碳化物等第二相来达到强化的目的	该类钢固溶处理时必须正确选择温度(温度偏低或过高都会使力学性能和耐蚀性下降)。时效处理时随着温度的升高,强化会出现一个峰值,相对应的冲击韧度却会出现低谷,为此必须正确选择时效温度,既达到强化的目的,又避开冲击韧度的低谷。其热处理制度及力学性能见表 1-81

表 1-76 奥氏体型不锈钢的固溶热处理工艺及力学性能

牌 号	旧 牌 号	固溶热处理		力学性能				硬度 HB
		温度(°C)	冷却 <sup>①</sup>	$R_{p0.2}$	$R_m$	$A_5$	$Z$	
				(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	
12Cr17Mn6Ni5N	1Cr17Mn6Ni5N	1 010~1 120	快冷	275	520	40	45	207
12Cr18Mn8Ni5N	1Cr18Mn8Ni5N	1 010~1 120	快冷	275	520	40	45	217
1Cr18Mn10Ni5Mo3N	1Cr18Mn10Ni5Mo3N	1 100~1 150	快冷	345	685	45	65	
12Cr17Ni7	1Cr17Ni7	1 010~1 150	快冷	205	520	40	60	187
12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	1 010~1 150	快冷	205	520	40	60	187
Y12Cr18Ni9	Y1Cr18Ni9	1 010~1 150	快冷	205	520	40	50	187
Y12Cr18Ni9Se	Y1Cr18Ni9Se	1 010~1 150	快冷	205	520	40	50	187
06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	1 010~1 150	快冷	205	520	40	60	187
022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	1 010~1 150	快冷	177	480	40	60	187
06Cr19Ni10N	0Cr19Ni9N	1 010~1 150	快冷	275	550	35	50	217
06Cr19Ni9NbN	0Cr19Ni10NbN	1 010~1 150	快冷	345	685	35	50	250
022Cr19Ni10N	00Cr18Ni10N	1 010~1 150	快冷	245	550	40	50	217
10Cr18Ni12	1Cr18Ni12	1 010~1 150	快冷	177	480	40	60	187
06Cr23Ni13	0Cr23Ni13	1 030~1 150	快冷	205	520	40	60	187
06Cr25Ni20	0Cr25Ni20	1 030~1 180	快冷	205	520	40	50	187
06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2	1 010~1 150	快冷	205	520	40	60	187
1Cr18Ni12Mo2Ti	1Cr18Ni12Mo2Ti	1 000~1 100	快冷	205	530	40	55	187
0Cr18Ni12Mo2Ti	0Cr18Ni12Mo2Ti	1 000~1 100	快冷	205	530	40	55	187
022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2	1 010~1 150	快冷	177	480	40	60	187
06Cr17Ni12Mo2N	0Cr17Ni12Mo2N	1 010~1 150	快冷	275	550	35	50	217
022Cr17Ni12Mo2N	00Cr17Ni13Mo2N	1 010~1 150	快冷	245	550	40	50	217
06Cr18Ni12Mo2Cu2	0Cr18Ni12Mo2Cu2	1 010~1 150	快冷	205	520	40	60	187
022Cr18Ni14Mo2Cu2	00Cr18Ni14Mo2Cu2	1 010~1 150	快冷	177	400	40	60	187
06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3	1 010~1 150	快冷	205	520	40	60	187
022Cr19Ni13Mo3	00Cr19Ni13Mo3	1 010~1 150	快冷	177	480	40	60	187
1Cr18Ni12Mo3Ti	1Cr18Ni12Mo3Ti	1 000~1 100	快冷	205	530	40	55	187
06Cr18Ni12Mo3Ti	0Cr18Ni12Mo3Ti	1 000~1 100	快冷	205	530	40	55	187
03Cr18Ni16Mo5	0Cr18Ni16Mo5	1 030~1 180	快冷	177	480	40	55	187
1Cr18Ni9Ti	1Cr18Ni9Ti	920~1 150	快冷	205	520	40	50	187
06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti	920~1 150	快冷	205	520	40	50	187
06Cr18Ni11Nb	0Cr18Ni11Nb	980~1 150	快冷	205	520	40	50	187
06Cr18Ni9Cu3	0Cr18Ni9Cu3	1 010~1 150	快冷	177	480	40	60	187
06Cr18Ni13Si4	0Cr18Ni13Si4	1 010~1 150	快冷	205	520	40	60	207

注：① 一般情况采用水冷，对于薄壁件可采用空冷。

表 1-77 铁素体型不锈钢的热处理工艺及力学性能

牌 号	旧 牌 号	退火热处理		力学性能				硬度 HB
		温度(°C)	冷却	$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)	
06Cr13Al	0Cr13Al	780~830	空冷	177	410	20	60	183
022Cr12	00Cr12	700~820	空冷	196	365	22	60	183
10Cr17	1Cr17	780~850	空冷	205	450	22	50	183
Y10Cr17	Y1Cr17	680~820	空冷	205	450	22	50	183
10Cr17Mo	1Cr17Mo	780~850	空冷	205	450	22	60	183
008Cr30Mo2	00Cr30Mo2	900~1 050	快冷	295	450	20	45	228
008Cr27Mo	00Cr27Mo	900~1 050	快冷	245	410	20	45	219

表 1-78 奥氏体-铁素体型不锈钢的热处理工艺及力学性能

牌 号	旧 牌 号	固溶热处理		力学性能					硬度 HB
		温度(°C)	冷却 <sup>①</sup>	$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)	$A_k$ (J)	
0Cr26Ni5Mo2	0Cr26Ni5Mo2	950~1 100	快冷	390	590	18	40		277
14Cr18Ni11Si4AlTi	1Cr18Ni11Si4AlTi	930~1 050	快冷	440	715	25	40	63	
022Cr19Ni5Mo3Si2N	00Cr18Ni5Mo3Si2	920~1 150	快冷	390	590	20	40		294

注：① 一般情况采用水冷，对于薄壁件可采用空冷。

表 1-79 马氏体型不锈钢的退火热处理工艺及硬度

牌 号	旧 牌 号	退火热处理(°C)	退火后的硬度 HB 不大于
12Cr12	1Cr12	800~900 缓冷或约 750 快冷	200
12Cr13	1Cr13	800~900 缓冷或约 750 快冷	200
06Cr13	0Cr13	800~900 缓冷或约 750 快冷	183
Y12Cr13	Y1Cr13	800~900 缓冷或约 750 快冷	200
13Cr13Mo	1Cr13Mo	800~900 缓冷或约 750 快冷	200
20Cr13	2Cr13	800~900 缓冷或约 750 快冷	223
30Cr13	3Cr13	800~900 缓冷或约 750 快冷	235
Y30Cr13	Y3Cr13	800~900 缓冷或约 750 快冷	235
32Cr13Mo	3Cr13Mo	800~900 缓冷或约 750 快冷	207
40Cr13	4Cr13	800~900 缓冷或约 750 快冷	201
14Cr17Ni2	1Cr17Ni2	680~700 高温回火空冷	285
68Cr17	7Cr17	800~920 缓冷	255

(续表)

牌 号	旧 牌 号	退火热处理 (°C)	退火后的硬度 HB 不大于
85Cr17	8Cr17	800~920 缓冷	255
95Cr18	9Cr18	800~920 缓冷	255
108Cr17	11Cr17	800~920 缓冷	269
Y108Cr17	Y11Cr17	800~920 缓冷	269
102Cr17Mo	9Cr18Mo	800~900 缓冷	269
90Cr18MoV	9Cr18MoV	800~920 缓冷	269

表 1-80 马氏体型不锈钢的淬回火热处理工艺及力学性能

牌 号	旧 牌 号	淬回火热处理 (°C)		经淬回火的力学性能和硬度						
		淬 火	回 火	$R_{p0.2}$	$R_m$	$A_5$	$Z$	$A_K$	HB	HRC
				(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(J)	不 小 于	
12Cr12	1Cr12	950~1 000 油冷	700~750 快冷	390	590	25	55	118	170	
12Cr13	1Cr13	950~1 000 油冷	700~750 快冷	345	540	25	55	78	159	
06Cr13	0Cr13	950~1 000 油冷	700~750 快冷	345	490	24	60			
Y12Cr13	Y1Cr13	950~1 000 油冷	700~750 快冷	345	540	25	55	78	159	
13Cr13Mo	1Cr13Mo	970~1 020 油冷	650~750 快冷	490	685	20	60	78	192	
20Cr13	2Cr13	920~980 油冷	600~750 快冷	440	635	20	50	63	192	
30Cr13	3Cr13	920~980 油冷	600~750 快冷	540	735	12	40	24	217	
Y30Cr13	Y3Cr13	920~980 油冷	600~750 快冷	540	735	12	40	24	217	
32Cr13Mo	3Cr13Mo	1 025~107 油冷	200~300 油、水、空冷							50
40Cr13	4Cr13	1 050~1 100 油冷	200~300 空冷							50
14Cr17Ni2	1Cr17Ni2	950~1 050 油冷	275~350 空冷		1 080	10		39		
68Cr17	7Cr17	1 010~107 油冷	100~180 快冷							54
85Cr17	8Cr17	1 010~107 油冷	100~180 快冷							56
95Cr18	9Cr18	1 000~105 油冷	200~300 油、空冷							55
108Cr17	11Cr17	1 010~107 油冷	100~180 快冷							58
Y108Cr17	Y11Cr17	1 010~107 油冷	100~180 快冷							58
102Cr17Mo	9Cr18Mo	1 000~105 油冷	200~300 空冷							55
90Cr18MoV	9Cr18MoV	1 050~107 油冷	100~200 空冷							55



表 1-81 沉淀硬化型不锈钢的热处理工艺及力学性能

牌 号	旧 牌 号	热 处 理		拉 伸 试 验				硬 度 试 验 HB
		种 类	条 件	$R_{\sigma_2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)	
05Cr17Ni4Cu4Nb	0Cr17Ni4Cu4Nb (马氏体型) (17-4PH)	固 溶	1 020~1 060℃快冷					≤363
		480℃时效	经固溶处理后, 470~490℃空冷	≥1 180	≥1 310	≥10	≥40	≥375
		550℃时效	经固溶处理后, 540~560℃空冷	≥1 000	≥1 060	≥12	≥45	≥331
		580℃时效	经固溶处理后, 570~590℃空冷	≥865	≥1 000	≥13	≥45	≥302
		620℃时效	经固溶处理后, 610~630℃空冷	≥725	≥930	≥16	≥50	≥277
07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al (半奥氏体型) (17-7PH)	固 溶	1 000~1 100℃快冷	≤380	≤1 030	≥20		≤229
		565℃时效	经固溶处理后, 于(760±15)℃保持 90 min, 在 1 h内冷却到 15℃以下, 保持 30 min, 加热到(565±10)℃保持 90 min 空冷	≥960	≥1 140	≥5	≥25	≥363
		510℃时效	经固溶处理后, 于(955±10)℃保持 10 min 空冷到室温, 在 24 h 以内冷却到(-73±6)℃, 保持 8 h, 再加热到(510±10)℃保持 60 min 后空冷	≥1 030	≥1 230	≥4	≥10	≥388
07Cr15Ni7Mo2Al	0Cr15Ni7Mo2Al (半奥氏体型) (PH15-7Mo)	固 溶	1 000~1 100℃快冷					
		565℃时效	经固溶处理后, 于(760±15)℃保持 90 min, 在 1 h内冷却到 15℃以下, 保持 30 min, 加热到(565±10)℃保持 90 min 空冷	≥1 100	≥1 210	≥7	≥25	≥375
		510℃时效	经固溶处理后, 于(955±10)℃保持 10 min 空冷到室温, 在 24 h 以内冷却到(-73±6)℃, 保持 8 h, 再加热到(510±10)℃保持 60 min 后空冷	≥1 210	≥1 320	≥6	≥20	≥388

## 二、耐热钢的性能与热处理工艺

耐热钢是指具有较好的热稳定性和热强性的钢种。按其高温下的抗氧化能力及强度可分为抗氧化钢和热强钢；按其空冷的组织状态分类可分为珠光体(贝氏体)热强钢、奥氏体型耐热钢、铁素体型耐热钢、马氏体型耐热钢和沉淀硬化型耐热钢。它们的性能与热处理工艺见表 1-82、表 1-83、表 1-84、表 1-85 和表 1-86。

表 1-82 奥氏体型耐热钢的热处理工艺及力学性能

牌 号	旧 牌 号	热处理(°C)	力学性能				硬度 HB
			$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)	
			不 小 于				
53Cr21Mn9Ni4N	5Cr21Mn9Ni4N	固溶 1100~1200 快冷； 时效 730~780 空冷	560	885	8		≥302
22Cr21Ni12N	2Cr21Ni12N	固溶 1050~1150 快冷； 时效 750~800 空冷	430	820	26	20	≤269
16Cr23Ni13	2Cr23Ni13	固溶 1030~1150 快冷	205	560	45	50	≤201
20Cr25Ni20	2Cr25Ni20	固溶 1030~1180 快冷	205	590	40	50	≤201
12Cr16Ni35	1Cr16Ni35	固溶 1030~1180 快冷	205	520	40	50	≤201
0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	0Cr15Ni25Ti2MoAlVB	固溶 885~915 或 965~995 快冷； 时效 700~760, 16 h 空冷 或缓冷	590	900	15	18	≥248
45Cr14Ni14W2Mo	4Cr14Ni14W2Mo	退火 820~850 快冷	315	705	20	35	≤248
26Cr18Mn12Si2N	3Cr18Mn12Si2N	固溶 1100~1150 快冷	390	685	35	45	≤248
22Cr20Mn9Ni2Si2N	2Cr20Mn9Ni2Si2N	固溶 1100~1150 快冷	390	685	35	45	≤248
06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3	固溶 1010~1150 快冷	205	540	40	60	≤187
06Cr18Ni13Si4	0Cr18Ni13Si4	固溶 1010~1150 快冷	205	520	40	60	≤207
16Cr20Ni14Si2	1Cr20Ni14Si2	固溶 1080~1130 快冷	295	590	35	50	≤187
16Cr25Ni20Si2	1Cr25Ni20Si2	固溶 1080~1130 快冷	295	590	35	50	≤187

注：1. 奥氏体型耐热钢除了表中所列钢种以外还有表 1-76 中的 06Cr19Ni10、06Cr23Ni13、06Cr25Ni20、06Cr17Ni12Mo2、1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni11Ti 和 06Cr18Ni11Nb。

2. 有些奥氏体型耐热钢固溶后再在高于使用温度 60~100°C 的温度下进行时效处理，使组织稳定，并通过强化相的析出进一步提高强度。

表 1-83 铁素体型耐热钢的热处理工艺及力学性能

牌 号	旧 牌 号	热处理(°C)	力学性能				硬度 HB
			$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z(%)	
			不 小 于				
16Cr25N	2Cr25N	退火 780~880 快冷	275	510	20	40	≤201

注：铁素体型耐热钢除了表中所列钢种以外还有表 1-77 中的 06Cr13Al、022Cr12 和 10Cr17。

表 1-84 马氏体型耐热钢的退火热处理工艺及硬度

牌 号	旧 牌 号	退火热处理 (°C)	退火后的硬度 HB 不大于
80Cr20Si2Ni	8Cr20Si2Ni	800~900 缓冷或约 720 空冷	321
12Cr12Mo	1Cr12Mo	800~900 缓冷或约 750 快冷	255
18Cr12MoVNBn	2Cr12MoVNBn	850~950 缓冷	269
22Cr12NiMoWV	2Cr12NiMoWV	830~900 缓冷	269

表 1-85 马氏体型耐热钢的淬回火热处理工艺及力学性能

牌 号	旧 牌 号	淬回火热处理 (°C)		经淬回火的力学性能和硬度						
		淬 火	回 火	$R_{p0.2}$	$R_m$	$A_5$	$Z$	$A_k$	HB	
				(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(J)		
不 小 于										
12Cr5Mo	1Cr5Mo	900~950 油冷	600~700 空冷	390	590	18				
42Cr9Si2	4Cr9Si2	1 020~1 040 油冷	700~780 油冷	590	835	19	50			
40Cr10Si2Mo	4Cr10Si2Mo	1 010~1 040 油冷	720~760 空冷	685	885	10	35			
80Cr20Si2Ni	8Cr20Si2Ni	1 030~1 080 油冷	700~800 快冷	685	885	10	15	8		≥262
14Cr11MoV	1Cr11MoV	1 050~1 100 空冷	720~740 空冷	490	685	16	55	47		
12Cr12Mo	1Cr12Mo	950~1 000 油冷	700~750 快冷	550	685	18	60	78		217~248
18Cr12MoVNBn	2Cr12MoVNBn	1 100~1 170 油冷或空冷	600 以上 空冷	685	835	15	30			≤321
15Cr12WMoV	1Cr12WMoV	1 000~1 050 油冷	680~700 快冷	585	735	15	45	47		
22Cr12NiMoWV	2Cr12NiMoWV	1 020~1 070 油冷或空冷	600 以上 空冷	735	885	10	25			≤341
13Cr11Ni2W2MoV	1Cr11Ni2W2MoV	1 000~1 020 正火	660~710 油冷或空冷	735	885	15	55	71		269~321
		1 000~1 020 油冷或空冷	540~600 油冷或空冷	885	1 080	12	50	55		311~388

注：马氏体型耐热钢除了表中所列钢种以外还有表 1-79 和表 1-80 中的 12Cr13、13Cr13Mo、20Cr13 和 14Cr17Ni2。马氏体型耐热钢热处理时应注意，回火温度一般高于使用温度 100°C，并应避开 400~600°C 的回火脆性区，回火后采用空冷或油冷。

表 1-86 珠光体(贝氏体)热强钢的淬回火热处理工艺及力学性能

牌 号	试样 毛坯 尺寸 (mm)	热 处 理 (°C)		经淬(正)回火的力学性能					使用 温度 (°C)
		淬火或正火	回 火	$R_{\rho.2}$	$R_m$	$A_3$	Z	$A_k$	
				(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(J)	
12CrMo	30	900 空冷	650 空冷	265	410	24	60	110	510
12Cr2Mo		930~970 空或风冷	≥680 空冷	310	515	18	30		566
15CrMo	30	900 空冷	650 空冷	295	440	22	60	94	510
20CrMo	15	880 水、油冷	500 水、油冷	685	885	12	50	78	
35CrMo	25	850 油冷	550 水、油冷	835	980	12	45	63	480
42CrMo	25	850 油冷	560 水、油冷	930	1 080	12	45	63	410
12CrMoV	30	970 空冷	750 空冷	225	440	22	50	78	550
12Cr1MoV	30	970 空冷	750 空冷	245	490	22	50	71	550
25Cr2MoVA	25	900 油冷	640 空冷	785	930	14	55	63	510
27Cr2MoVA	试样	940~960 油冷	640~690 空冷	735	834	15	50	59	525
25Cr2Mo1VA	25	1 040 空冷	700 空冷	590	735	16	50	47	540
35CrMoV	25	900 油冷	630 水、油冷	930	1 080	10	50	71	520
12Cr3MoVSiTiB	试样	1 050~1 090 空冷	740~770 空冷	441	608~804	16			620
20Cr1Mo1VNbTiB	试样	1 030~1 050 油冷	700~730 空冷	685	785	14	50	49	565
20Cr1Mo1VTiB	试样	1 030~1 050 油冷	700~720 空冷	685	785	14	50	49	565
20Cr3MoWV	试样	1 040~1 060 油冷	650~720 空冷	635	785	14	40	69	550
12Cr2MoWVTiB	试样	1 000~1 035 空冷	760~790 空冷	343	540~736	18			620
12MoVWBSiXt	试样	970~1 010 空冷	760~780 空冷	314	540~687	18			580
16Mo	试样	900~950 空冷	600~680 空冷	245	392	25	60		500

沉淀硬化型耐热钢有 05Cr17Ni4Cu4Nb 和 07Cr17Ni7Al, 其热处理制度及力学性能见表 1-81。

### 三、耐磨钢的水韧处理

耐磨钢具有高耐磨性, 它的种类较多, 如模具钢、轴承钢都属于耐磨钢的范畴。在冲击载荷下发生冲击硬化的高锰钢是典型的耐磨钢。这种钢机械加工比较困难, 基本上都用于铸件。铸态下的高锰钢硬而脆, 须经加热至奥氏体状态进行水韧处理。图 1-7 为 Fe-C-Mn 三元相图中 13% Mn 处的垂直截面。由图可见, 加热到  $A_{cm}$  线以上时所有碳化物均溶入奥氏体中, 水冷后可获得均匀的奥氏体组织, 具有很高的韧性。

水韧处理的加热温度一般为 1 000~1 100°C, 水韧处理后一般不再进行回火。水韧处理后的高锰钢再加热到超过 300°C 时, 极短时间内即开始析

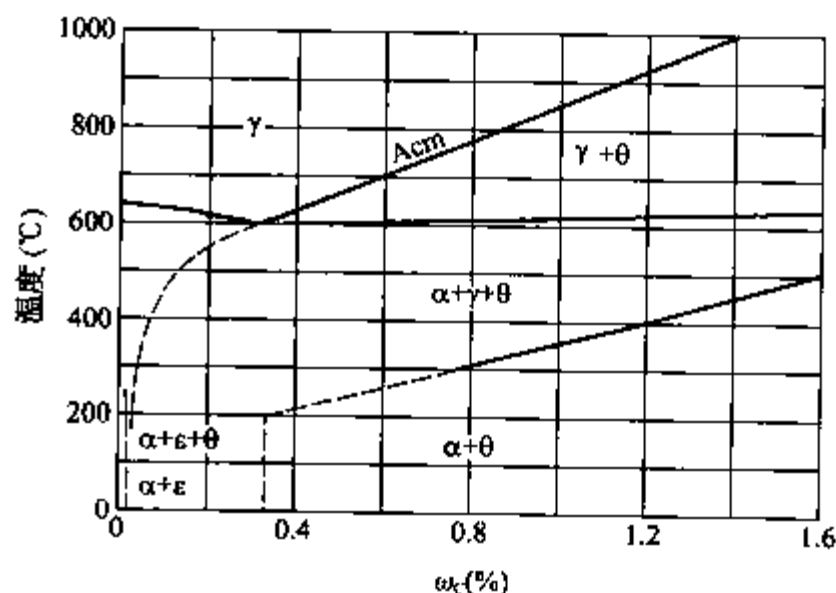


图 1-7 13%Mn 钢的垂直截面相图

出碳化物,使性能变脆。常用的铸造高锰钢的牌号及性能见表 1-52。

#### 四、高温合金的牌号与热处理工艺

高温合金也称热强合金、耐热合金或超合金,兼有热稳定性和热强性,能在高温氧化和腐蚀条件下承受复杂应力,并长期可靠地工作。

高温合金分为变形高温合金和铸造高温合金。按基体元素可分为铁基、镍基和钴基变形高温合金。按高温性能及用途的不同,可分为固溶强化型和时效强化型合金。

高温合金采用固溶强化、第二相强化和晶界强化三种手段对合金进行综合强化。高温合金的基本热处理为固溶处理和时效处理。较高的固溶处理温度可使强化相  $\gamma'$  相[镍基合金典型的  $\gamma'$  相为  $\text{Ni}_3(\text{AlTi})$ ]和碳化物固溶,晶粒长大,获得最佳的持久蠕变强度。较低的固溶处理温度可溶解主要的强化相,获得高的瞬时拉伸强度。中等固溶处理温度可获得较好的综合性能。

时效处理可以是单级的或多级的,也可以是阶梯式的。温度和次数的选择取决于预期的使用温度、析出的有效沉淀相的类型和数量、析出相的尺寸和所要求的强度和塑性、韧性的组合。

高温合金常用的固溶+时效工艺有以下几种组合方式:

一次固溶+一次时效工艺多用于简单合金化的高温合金;

二次固溶+一次时效工艺用以控制晶界碳化物的析出及调整  $\gamma'$  相尺寸;

二次固溶+二次时效用以获得较好的晶界组织和两种大小  $\gamma'$  质点,有良好的强塑性配合。

##### (一) 高温合金牌号命名法

(1) 变形高温合金牌号以汉语拼音字母“GH”后接四位阿拉伯数字表示,第一位数字表示分类号,第二、三、四位数字表示合金的编号,见表 1-87。

表 1-87 变形高温合金分类号

分类号数字	分 类	分类号数字	分 类
1	固溶强化型铁基合金	4	时效强化型镍基合金
2	时效强化型铁基合金	5	固溶强化型钴基合金
3	固溶强化型镍基合金	6	时效强化型钴基合金

(2) 铸造高温合金牌号以汉语拼音字母“K”作前缀,后接三位阿拉伯数字,第一位数字表示分类号,第二、三位数字表示合金的编号,见表 1-88。高温合金国内外牌号对照见表 1-89。

表 1-88 铸造高温合金分类号

分类号数字	分 类	分类号数字	分 类
2	时效强化型铁基合金	6	时效强化型钴基合金
4	时效强化型镍基合金		

表 1-89 高温合金国内外牌号对照

中国牌号	国外相近牌号	中国牌号	国外相近牌号	中国牌号	国外相近牌号
GH1035	俄 ЭИ703	GH2132	美 A286	GH2903	美 Incoloy903
GH1040	俄 ЭИ395	GH2150	俄 ЭИ718	GH2907	美 Incoloy907
GH1131	俄 ЭИ126	GH2696	俄 ЭИ696M	GH3030	俄 ЭИ435
GH19	美 NI55	GH2706	美 Incone1706	GH3039	俄 ЭИ602
GH2036	俄 ЭИ481	GH2901	美 Incoloy901	GH3044	俄 ЭИ868

(续表)

中国牌号	国外相近牌号	中国牌号	国外相近牌号	中国牌号	国外相近牌号
GH3536	美 HastelloyX	GH4141	美 Rene41	K418	美 INCO713C
GH3600	美 Inconel600	GH148	英 Nimonic108	K438	美 IN738
GH3625	美 Inconel625	GH146	美 Udimet500	K640	美 X-40, HS-31
GH4032	俄 ЭИ437А	GH4163	英 C263	K418B	美 INCO713LC
GH4033	俄 ЭИ437Б	GH4220	俄 ЭП220	K423	英 C1023
GH4037	俄 ЭИ617	GH4698	俄 ЭИ698	K424	俄 ВЖЛ-12У
GH4043	俄 ЭИ598	GH4710	美 Udimet710	K438G	美 IN738LC
GH4049	俄 ЭИ929	GH4738	美 Waspaloy	K40	美 IN792
GH4145	美 InX-750	K211	俄 ВЛ7-45У	K4002	美 MAR-M002
GH4169	美 Inconel718	K401	俄 АНВ300	K477	美 Rene'77
GH4080A	英 Nimonic80A	K403	俄 ЖС6К	K123	美 Rene'125
GH4090	英 Nimonic90	K406	美 GMR-235D 俄 ВЖЛ-8	K136	美 V57
GH4093	英 Nimonic93	K409	美 B1900	K718	美 INCO718C
GH4099	俄 ЭП693	K412	俄 ЖС3	DZ3	俄 ЖС6КНН
GH4105	英 Nimonic105	K417	美 IN-100	DZ422	美 PWA1422
GH118	英 Nimonic118	K417G	美 Rene'100	DZ4002	美 MAR-M002(DS)

## (二) 铁基变形高温合金的热处理工艺(表 1-90)。

表 1-90 铁基变形高温合金的热处理工艺

合金牌号	工序名称	热 处 理 工 艺			备 注
		加热温度(°C)	保温时间	冷却方式	
GH1015	中间退火	1 080	板材: 5~15 min 锻件: 1 min/mm	空冷或水冷	板材厚度 ≤ 3 mm, 5~12 min
	固溶处理	1 150		空冷或水冷	
	消除应力退火	1 000		空 冷	
GH1016	中间退火	1 080	板材: 5~15 min 锻件: 1.4 min/mm	空冷或水冷	
	固溶处理	1 160		空冷或水冷	
	消除应力退火	1 000		空 冷	
GH1035	中间退火	1 060~1 100	板材: 1.2~2 min/mm 棒材: 1~1.5 h	空 冷	
	固溶处理	1 120~1 150			
GH1040	固溶处理	1 200	1 h	空 冷	
	时 效	700	16 h		
GH1131	中间退火	1 000	板材: 5~15 min 锻件: 1.4 min/mm	空 冷	
	固溶处理	1 150			
GH1140	中间退火	1 050	板材: 5~20 min 锻件: 1~2 h	空冷或水冷	
	固溶处理	1 080		空 冷	综合性能好
		1 150			热强性高
	消除应力退火	940			1.5~2 h

(续表)

合金牌号	工序名称	热 处 理 工 艺			备 注	
		加热温度(°C)	保温时间	冷却方式		
GH19	固溶处理	1 180	10~15 min	空 冷	适用于板材零件	
	消除应力退火	650	2~4 h			
GH1035A	固溶处理	1 180	2 h	水 冷	适用于棒材和锻件	
	时 效	680	16 h	空 冷		
GH2018	退火或固溶	1 120~1 150	8~12 min	空 冷	适用于板材零件	
	时 效	800	16 h			
GH2036	固溶处理	1 140	80 min	流动水冷	大型锻件保温 3 h	
	时 效	660°C 16 h 继续升温至 770~800°C 16 h 空冷				
GH2038	固溶处理	1 140	2 h	流动水冷		
	时 效	780	16~25 h	空 冷		
GH2130	一次固溶	1 180	1.5 h	空 冷		
	二次固溶	1 050	4 h			
	时 效	800	16~20 h			
	消除应力退火	1 000	10~15 min	冷至 700°C 空冷		氮气保护
	补充时效	800	4 h	空 冷		
GH2132	退火或固溶	980	板材: 8 min/mm 棒材: 1 h / 25 mm 锻件: 1~2 h	厚度 < 2.2 mm 空冷, 其余油冷	冷、热成形和焊接 后需固溶	
	时 效	720	16 h	空 冷	适用于各类锻件	
	时 效	600~650	16 h	空 冷	适用于冷作材料	
GH2135	固溶处理	1 140	8 h	空 冷	适用于各类锻件	
	一次时效	830	8 h	空 冷		
	二次时效	700	16 h	空 冷		
	固溶处理	1 180	8 h	空 冷	适用于棒材制造的 零件	
	一次时效	830	8 h	空 冷		
	二次时效	700	16 h	空 冷		
	渗 铝	700	16 h	空 冷	与二次时效合并 进行	
GH2302	一次固溶	1 180	2 h	空 冷	适用于棒材制造的 零件	
	二次固溶	1 050	4 h	空 冷		
	时 效	800	16 h	空 冷		
	固溶处理	1 120	5~25 min	空 冷	适用于板材零件	
	时 效	800	16 h	空 冷		
	渗 铝	800	8h	空 冷		与时效结合进行

(续表)

合金牌号	工序名称	热 处 理 工 艺			备 注
		加热温度(°C)	保温时间	冷却方式	
GH2150	中间退火	1 000	板材: 5~15 min 锻件适当长些	空 冷	
	固溶处理	1 040		空 冷	
	时 效	750	3~5 h	空 冷	
GH2696	固溶处理	1 100~1 120	3~5 h	油 冷	适用于锻成形的零件
	一次时效	840~850	16~25 h	空 冷	
	二次时效	700~730	16~24 h	空 冷	
	退 火	980	2 h	空 冷	适用于冷成形的高强度螺栓
	时 效	750°C 16 h 炉冷至 650°C 16 h 空冷			
	时 效	700~750°C 3~5 h 炉冷至 650°C 空冷			适用于冷成形弹性元件
GH2706	退火或固溶	955	≥30 min	按需要	720°C 保温 8 h 后 或以 55°C/h 冷速炉 冷至 620°C 保温 8 h 空冷
	一次时效	845	3 h	空 冷	
	二次时效	720°C 8 h 炉冷至 620°C 总时间 18 h 空冷			
GH2761	固溶处理	1 120	2 h	水 冷	适用于大型锻件
	一次时效	850	4 h	空 冷	
	二次时效	750	24 h	空 冷	
	固溶处理	1 090	2 h	水 冷	适用于其他锻件
	一次时效	850	4 h	空 冷	
	二次时效	750	24 h	空 冷	
GH2901	退火或固溶	1 090	2 h	水或油冷	按硬度要求选择二 次时效温度
	一次时效	780	4 h	空 冷	
	二次时效	700~730	24 h	空 冷	
	消除应力退火	650	4 h	空 冷	
GH2903	固溶处理	845	1 h	空 冷	
	时 效	720°C 8 h 以 55°C/h 炉冷至 620°C 8 h 空冷			
GH2907	固溶处理	980	1 h	空 冷	适用于棒材 适用于锻件
	时 效	775°C 12 h 以 55°C/h 炉冷至 620°C 8 h 空冷			



## (三) 镍基变形高温合金的热处理工艺(表 1-91)

表 1-91 镍基变形高温合金的热处理工艺

合金牌号	工序名称	热 处 理 工 艺			备 注
		加热温度(°C)	保温时间	冷却方式	
GH3030	退火或固溶	1 000	8~16 min	空 冷	综合性能好
	固溶处理	1 150	8~16 min	空 冷	热强性高
	消除应力退火	760	60 min	空 冷	
GH3039	中间退火	1 050	8~16 min	空冷或水冷	
	固溶处理	1 080	8~16 min	空 冷	综合性能好
		1 170	8~16 min	空 冷	热强性高
	消除应力退火	760	60 min	空 冷	
GH3044	中间退火	1 140	板材 8~16 min 棒材 2.5 h	空 冷	
	固溶处理	1 150		空 冷	综合性能好
		1 200		空 冷	热强性高
GH3128	中间退火	1 100	板材 8~16 min 棒材 1.5 h	空 冷	
	固溶处理	1 160		空 冷	综合性能好
		1 200		空 冷	热强性高
GH3170	中间退火	1 170	板材 8~16 min 棒材 1.5 h	空 冷	
	固溶处理	1 230			
GH3536	退火或固溶	1 175	板材 8~16 min 棒材 1.5 h	快速空冷 或水冷	高的持久性能
		1 065			高的疲劳性能
	消除应力退火	980	60 min	空 冷	焊接组合作
		870	30~60 min	空 冷	机加工后用
		760	120 min	空 冷	稳定尺寸处理
GH3600	退 火	980	15 min	空冷或水冷	板材最大成形性
		1 050	1.5 h	空 冷	适用于锻件
	消除应力退火	965	25 min	快速空冷	磨削后采用
		760~870	60 min	快速空冷	冷变形后采用
GH3625	退火或固溶	980	60 min/25 mm	空冷或快冷	
	消除应力退火	965	25 min	快速空冷	磨削后采用
		760~870	60 min	快速空冷	冷变形后采用
GH4032	固溶处理	1 080	8 h	空 冷	
	时 效	700	16 h	空 冷	
GH4033	固溶处理	1 080	8 h	空 冷	
	时 效	700	16 h	空 冷	适用于棒材
		750	16 h	空 冷	适用于锻件
GH4037	一次固溶	1 180	2 h	分散空冷	GH4037S 一次固 溶 1 170°C
	二次固溶	1 050	4 h	空冷或缓冷	
	时 效	800	16 h	空 冷	

(续表)

合金牌号	工序名称	热 处 理 工 艺			备 注	
		加热温度(°C)	保温时间	冷却方式		
GH4043	一次固溶	1 170	5 h	空 冷		
	二次固溶	1 070	8 h	空 冷		
	时 效	800	16 h	空 冷		
GH4049	一次固溶	1 200	2 h	分散空冷	允许采用 950°C 2 h 空冷时效	
	二次固溶	1 050	4 h	分散空冷		
	时 效	800	8 h	空 冷		
GH4099	中间退火	1 100	15~20 min	空冷或水冷	大型板材结构件可 在固溶处理后不经时 效直接使用	
	固溶处理	1 140	10~20 min	空 冷		
	时 效	900	4 h	空 冷		
GH4133 GH4133B	固溶处理	1 080	8 h	空 冷	适用于 750°C 以下 工作的各种锻件	
	时 效	750	16 h	空 冷		
GH4145	固溶处理	1 100	2 h	空 冷	适用于 677°C 以下 工作的零件	
	一次时效	835~855°C 24 h 2 h 内炉冷至				
	二次时效	695~715°C 20 h 空冷				
GH4169	中间退火	1 010	20~45 min	快速空冷	用于恢复塑性	
	固溶处理	950~980	1 h	油冷、空冷或水冷	或在 720°C 保温 8 h 炉冷至 620°C 保温 至时效总时间为 18 h	
	一次时效	720°C 8 h 40~55°C/h 炉冷至				
	二次时效	620°C 8 h 空冷				
	固溶处理	1 140	10~20 min	空 冷		
	时 效	900	4 h	空 冷		
GH4698	一次固溶	1 120	8 h	空 冷		
	二次固溶	1 000	4 h	空 冷		
	时 效	775	16 h	空 冷		
GH4080A	退 火	1 080	2 h / 25 mm	空 冷		
	固溶处理	1 080	8 h	空 冷		
	时 效	700	16 h	空 冷		
		750	4 h	空 冷		
GH4090	退 火	1 080	2 h / 25 mm	空 冷		
	I	固溶处理	1 080	8 h	空 冷	
		时 效	700	16 h	空 冷	适用于多数零件
			750	4 h	空 冷	适用于紧固件
	II	固溶处理	1 100~1 150	1~10 min	空或水冷	适用于板、带制件
		时 效	750	4 h	空冷	
	III	时 效	700~725	4 h	空冷	冷轧板、带件
	IV	时 效	600	16 h	空 冷	适用于冷拉丝材 制件
			或 650	16 h	空 冷	

(续表)

合金牌号	工序名称	热 处 理 工 艺			备 注	
		加热温度(°C)	保温时间	冷却方式		
GH4093	固溶处理	1 050~1 080	8 h	空 冷		
	时 效	710	16 h	空 冷		
GH4105	退 火	1 150	0.5~4 h	空冷或快冷	不能水冷	
	I	一次固溶	1 150	4 h	空 冷	
		二次固溶	1 030	16 h	空 冷	
		时 效	700	16 h	空 冷	
	II	固溶处理	1 125	1~4 h	空或水冷	适用于紧固件
		时 效	850	16 h	空 冷	
GH118	固溶处理	1 190	1.5 h	空 冷		
	时 效	1 100	6 h	空 冷		
GH4141	退 火	1 065~1 175	20~45 min	4 s内水冷至 650°C	最大成形性	
		1 080		20°C/min 冷至 650°C	可减少焊后应变时效裂纹	
	I	固溶处理	1 065~1 080	1 h	空 冷	较高的拉伸强度
		时 效	760	16 h	空 冷	
	II	固溶处理	1 120	1 h	空 冷	较好的综合性能
		时 效	900	4 h	空 冷	
	III	固溶处理	1 175	1 h	空 冷	较高的持久蠕变强度
		时 效	900	4 h	空 冷	
	GH143	一次固溶	1 150	4 h	空 冷	
		二次固溶	1 065	16 h	空 冷	
时 效		700	16 h	空 冷		
GH146 (GH4500)	一次固溶	1 180	2 h	空 冷	为获得适当的持久蠕变强度可选择适当的一次固溶温度,为获得最佳拉伸性能可省去第一次固溶处理	
		1 120	2 h	空 冷		
	一次固溶	1 080	4 h	空 冷		
	一次时效	845	24 h	空 冷		
	二次时效	760	16 h	空 冷		
GH4163	中间退火	1 070~1 080	5~15 min	空 冷		
	固溶处理	1 150	4 min/mm	水、油、空冷		
	时 效	800	8 h	空 冷		
GH4220	I	一次固溶	1 220	4 h	空 冷	
		二次固溶	1 050	4 h	空 冷	
		时 效	950	2 h	空 冷	
	II	一次固溶	1 220°C 4 h 空冷至 1 070°C 转			
		二次固溶	1 070°C 2.5 h 空冷			
		时 效	950	2 h	空 冷	

(续表)

合金牌号	工序名称	热 处 理 工 艺			备 注	
		加热温度(°C)	保温时间	冷却方式		
GH4710	一次固溶	1 170 或 1 150	4 h	空 冷	1 170°C 固溶者晶粒粗大 1 150°C 固溶者晶粒细小	
	二次固溶	1 080	4 h	空 冷		
	一次时效	845	24 h	空 冷		
	二次时效	760	16 h	空 冷		
GH4738	退 火	1 010	4 h / 25 mm	空 冷	适用于锻件	
	I	固溶处理	1 080	4 h		空 冷
		一次时效	840	24 h		空 冷
		二次时效	760	16 h	空 冷	
	II	固溶处理	980~1 010	2 h	空 冷	适用于板材
		一次时效	840	4 h	空 冷	
二次时效		760	16 h	空 冷		

## (四) 铸造高温合金的热处理工艺(表 1-92)

表 1-92 铸造高温合金的热处理工艺

合金牌号	工序名称	热 处 理 工 艺			备 注
		加热温度(°C)	保温时间	冷却方式	
K211	时 效	900	5 h	空 冷	
K214	固溶处理	1 100	5 h	空 冷	
K401	固溶处理	1 120	10 h	空 冷	
K403	固溶处理	1 210	4 h	空 冷	
K406	时 效	980	5 h	空 冷	或铸态使用
K409	固溶处理	1 080	4 h	空 冷	或铸态使用
	时 效	980	10 h	空 冷	
K412	固溶处理	1 150	7 h	空 冷	
K418	固溶处理	1 170	2 h	空 冷	
	时 效	930	16 h	空 冷	
K438	固溶处理	1 120	2 h	空 冷	
	时 效	850	24 h	空 冷	
K406C	时 效	980	5 h	空 冷	
K417F	一次固溶	1 180	2 h	空 冷	
	二次固溶	1 080	4 h	空 冷	
	时 效	850	24 h	空 冷	
K418B	固溶处理	1 180	2 h	空 冷	
	消除应力退火	930~950	2 h	空 冷	
K419H	时 效	870	16 h	空 冷	

(续表)

合金牌号	工序名称	热 处 理 工 艺			备 注	
		加热温度(°C)	保温时间	冷却方式		
K423	固溶处理	1 190°C 15 min 于 45 min 内炉冷至 1 000°C 空冷				
K438G	固溶处理	1 120	2 h	分散空冷		
	时 效	850	24 h	空 冷		
K640	一次固溶	1 180	2 h	分散空冷		
	二次固溶	1 080	4 h	空 冷		
	时 效	850	24 h	空 冷		
K4002	时 效	870	16 h	空 冷		
K477	一次固溶	1 160	4 h	空 冷	合金经该规范热处理后具有较高的持久强度	
	二次固溶	1 080	4 h	空 冷		
	一次时效	930	24 h	空 冷		
	二次时效	760	16 h	空 冷		
K125	一次固溶	1 180	2 h	空 冷		
	二次固溶	1 080	4 h	空 冷		
	时 效	815	16 h	空 冷		
K136	I	固溶处理	980	1 h	油 冷	两种规范均可选择使用
		一次时效	700	16 h	空 冷	
		二次时效	650	16 h	空 冷	
	II	固溶处理	1 050	4 h	油 冷	
		时 效	710	32 h	空 冷	
K718	扩散退火	1 095	1~2 h	按需要冷却		
	固溶处理	955~980	1 h	空冷或更快		
	时 效	720°C 8 h 炉冷至 620°C 至总时间 18 h 空冷或更快				
DZ3	固溶处理	1 210	4 h	快 冷		
	一次时效	950	5 h	快 冷		
	二次时效	870	32 h	快 冷		
DZA04	固溶处理	1 210	2 h	快 冷		
	一次时效	950	5 h	快 冷		
	二次时效	870	32 h	快 冷		
DZA05	固溶处理	1 210	4 h	快 冷		
	时 效	870	32 h	快 冷		
DZA22	固溶处理	1 210	2 h	通氩快冷		
	时 效	870	32 h	通氩快冷		

(续表)

合金牌号	工序名称	热 处 理 工 艺			备 注
		加热温度(°C)	保温时间	冷却方式	
DZ438G	一次固溶	1 190	2 h	空 冷	零件散装平放
	二次固溶	1 090	2 h	空 冷	
	时 效	850	24 h	空 冷	
DZ4002	固溶处理	1 210	2 h	快 冷	
	一次时效	950	5 h	快 冷	
	二次时效	870	32 h	快 冷	
		或 900	16 h	快 冷	
DD403	固溶处理	1 250	4 h	通氩吹冷	在真空或氩气中进行
	时 效	870	32 h	空 冷	

## 第六节 铸铁的牌号、性能与热处理工艺

### 一、灰铸铁

#### (一) 灰铸铁的牌号与性能(GB/T9439—1988)

灰铸铁的化学成分通常为  $w_C$  2.7%~3.5%、 $w_{Si}$  1.0%~2.2%、 $w_{Mn}$  0.5%~1.3%、 $w_P \leq 0.03\%$ 、 $w_S \leq 0.15\%$ 。

灰铸铁的牌号根据直径  $\phi 30$  mm 单铸试棒的抗拉强度分为六个牌号,它们的性能见表 1-93、表 1-94 和表 1-95。

表 1-93 灰铸铁单铸试棒的抗拉强度

牌 号	HT100	HT150	HT200	HT250	HT300	HT350
最小的抗拉强度 $R_m$ (MPa)	100	150	200	250	300	350

表 1-94 灰铸铁附铸试棒(块)的抗拉强度

牌 号	铸件壁厚(mm)		最小的抗拉强度 $R_m$ (MPa)				铸 件 (仅供参考)
	大于	至	附 铸 试 棒		附 铸 试 块		
			$\phi 30$ mm	$\phi 50$ mm	R15 mm	R25 mm	
HT150	20	40	130		120		120
	40	80	115	115	110		105
	80	150		105		100	90
	150	300		100		90	80
HT200	20	40	180		170		165
	40	80	160	155	150		145
	80	150		145		140	130
	150	300		135		130	120

(续表)

牌 号	铸件壁厚(mm)		最小的抗拉强度 $R_m$ (MPa)				铸 件 (仅供参考)
	大于	至	附铸试棒		附铸试块		
			$\phi 30$ mm	$\phi 50$ mm	R15 mm	R25 mm	
HT250	20	40	220		210		205
	40	80	200	190	190		180
	80	150		180		170	165
	150	300		165		160	150
HT300	20	40	260		250		245
	40	80	235	230	225		215
	80	150		210		200	195
	150	300		195		185	180
HT350	20	40	300		295		285
	40	80	270	265	260		255
	80	150		240		230	225
	150	300		215		210	205

表 1-95 不同壁厚的灰铸铁件的抗拉强度

牌 号	铸件壁厚 (mm)		最小的抗拉强度 $R_m$ (MPa)
	大于	至	
HT100	2.5	10	130
	10	20	100
	20	30	90
	30	40	80
HT150	2.5	10	175
	10	20	145
	20	30	130
	30	40	120
HT200	2.5	10	220
	10	20	195
	20	30	170
	30	40	160
HT250	4.0	10	270
	10	20	240
	20	30	220
	30	40	200
HT300	10	20	290
	20	30	250
	30	40	230
HT350	10	20	340
	20	30	290
	30	40	260

## (二) 灰铸铁的热处理工艺

### 1. 去应力退火

去应力退火的目的是为了消除铸件的残留应力、稳定尺寸、减少或消除切削加工应力。去应力退火规范见表 1-96。

表 1-96 灰铸铁铸件去应力退火规范

铸件种类	铸件质量 (kg)	装炉温度 (°C)	升温速度 (°C/h)	加热温度 (°C)		保温时间 (h)	冷却速度 (°C/h)	出炉温度 (°C)
				普通铸铁	低合金铸铁			
一般铸件	<200	≤200	≤100	500~550	550~570	4~6	≤30	≤200
	200~2500	≤200	≤80	500~550	550~570	6~8	≤30	≤200
	>2500	≤200	≤60	500~550	550~570	8	≤30	≤200
精密铸件	<200	≤200	≤100	500~550	550~570	4~6	≤20	≤200
	200~3500	≤200	≤80	500~550	550~570	6~8	≤20	≤200

### 2. 石墨化退火

石墨化退火的目的主要是石墨化、降低硬度、改善加工性能、提高铸件的塑性和韧性。石墨化退火分为低温石墨化退火和高温石墨化退火。

若铸件中不存在共晶渗碳体或其数量不多时,可进行低温石墨化退火。低温石墨化退火工艺是将铸件加热到稍低于  $A_{c1}$  下限的温度,保温适当的时间使共析渗碳体分解,然后随炉冷却。其工艺曲线见图 1-8。

当铸件中共晶渗碳体数量较多时须进行高温石墨化退火。高温石墨化退火工艺是将铸件加热到高于  $A_{c1}$  上限的温度,使自由渗碳体分解为奥氏体和石墨,保温适当的时间后根据所要求的基体组织按不同的方式进行冷却。如果要求获得高塑、韧性的铁素体基体,其工艺曲线见图 1-9;如果要求获得强度高、耐磨性好的珠光体基体,其工艺曲线见图 1-10。

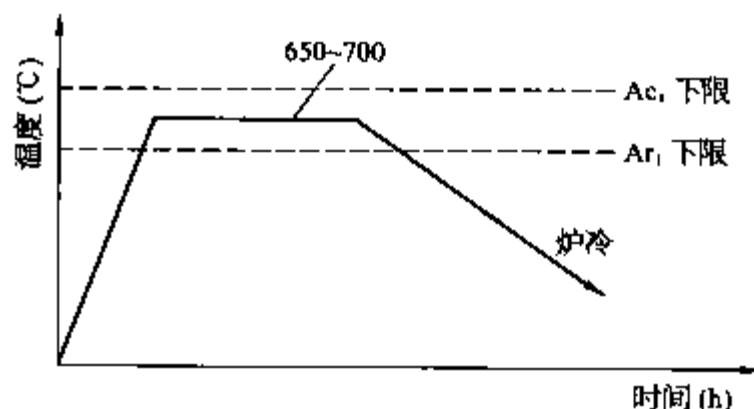


图 1-8 灰铸铁低温石墨化退火工艺曲线

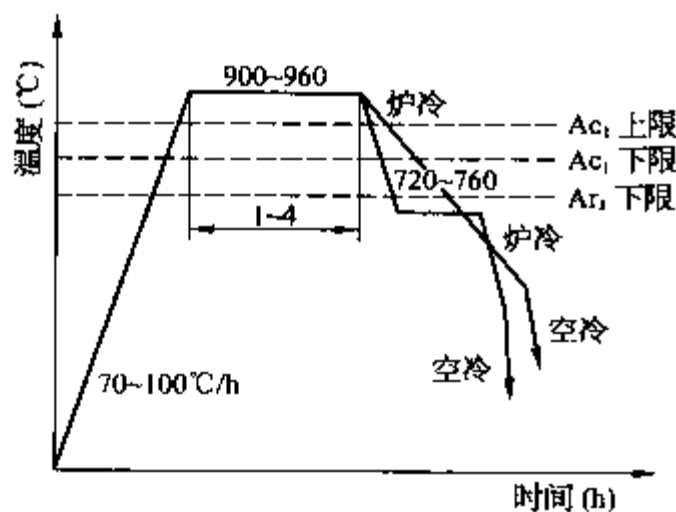


图 1-9 铁素体基体高温石墨化退火工艺曲线

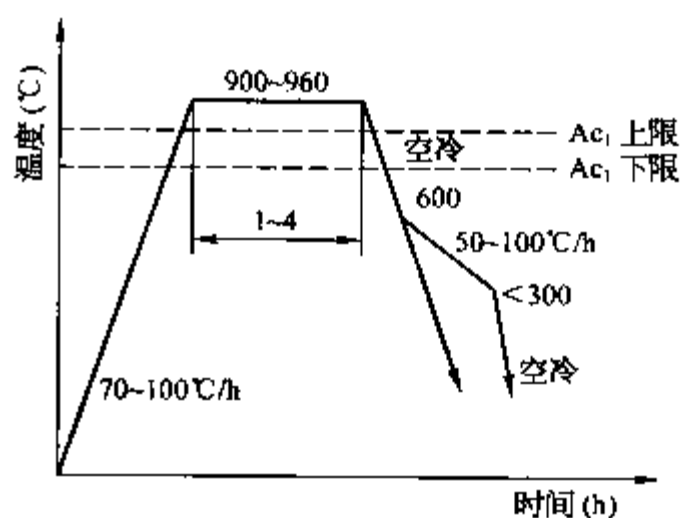


图 1-10 珠光体基体高温石墨化退火工艺曲线

### 3. 正火

正火的目的是提高铸件的强度、硬度和耐磨性,或作为表面淬火的预备热处理,改善基体组织。

灰铸铁的正火工艺一般是将铸件加热到  $A_{c1}$  上限  $30\sim 50^\circ\text{C}$ ,使原始组织转变为奥氏体,保温适当的时间后出炉空冷,其工艺曲线见图 1-11。如果原始组织中存在过量的自由渗碳体,则必须先进行高温石墨化以消除自由渗碳体,然后冷却到正火的温度保温适当的时间后出炉空冷,其工艺曲线见图 1-12。



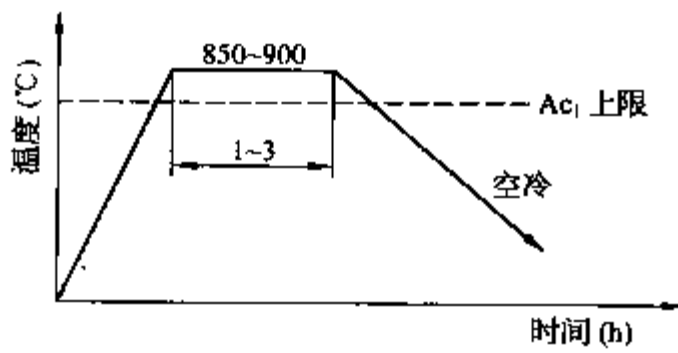


图 1-11 灰铸铁一般正火工艺曲线

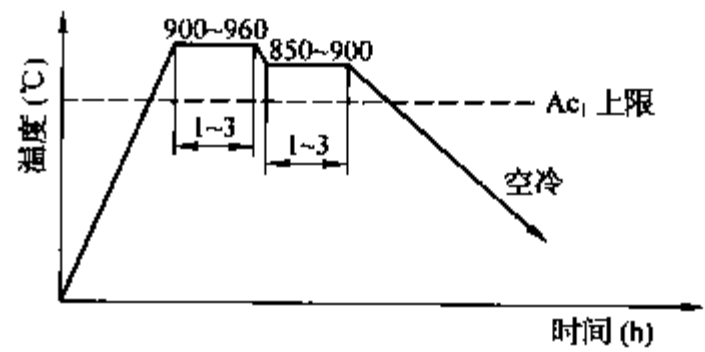


图 1-12 原始组织中存在自由渗碳体的灰铸铁正火工艺曲线

#### 4. 淬火与回火

铸铁淬火工艺是将铸件加热到  $Ac_1$  上限  $+(30\sim 50^\circ\text{C})$  的温度, 一般取  $850\sim 900^\circ\text{C}$ , 使组织转变成奥氏体, 并在此温度下保温适当的时间后进行淬火。通常采用油淬。淬火冷却后应尽快回火, 避免造成铸件开裂, 回火温度一般应低于  $550^\circ\text{C}$ , 回火保温时间  $t$  按  $t = [\text{铸件厚度}(\text{mm})/25] + 1(\text{h})$  计算。

## 二、球墨铸铁

### (一) 球墨铸铁的牌号与性能(GB/T1348—1988)

球墨铸铁的牌号根据单铸试块的抗拉强度和断后伸长率分为八个牌号, 它们的性能见表 1-97、表 1-98、表 1-99。其大致参考的化学成分见表 1-100。

表 1-97 球墨铸铁单铸试块的力学性能和金相组织

牌 号	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	A (%)	$a_k(\text{J}/\text{cm}^2)$		HB	主要金相组织
				室温( $23\pm 5$ ) $^\circ\text{C}$	低温( $-20\pm 2$ ) $^\circ\text{C}$		
不 小 于							
QT400-18	400	250	18	14		130~180	铁素体
QT400-18L <sup>①</sup>	400	250	18		12	130~180	铁素体
QT400-15	400	250	15			130~180	铁素体
QT450-10	450	310	10			160~210	铁素体
QT500-7	500	320	7			170~230	铁素体+珠光体
QT600-3	600	370	3			190~270	珠光体+铁素体
QT700-2	700	420	2			225~305	珠光体
QT800-2	800	480	2			245~335	珠光体或回火组织
QT900-2	900	600	2			280~360	贝氏体或回火马氏体

注: ① 字母“L”表示该牌号在低温时的冲击值。

表 1-98 球墨铸铁附铸试块的力学性能和金相组织

牌 号	铸件壁厚 (mm)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	A (%)	$a_k(\text{J}/\text{cm}^2)$		HB	主要金相组织
					室温 ( $23\pm 5$ ) $^\circ\text{C}$	低温 ( $-20\pm 2$ ) $^\circ\text{C}$		
不 小 于								
QT400-18A <sup>①</sup>	>30~60	390	250	18	14		130~180	铁素体
	>60~200	370	240	12	12			
QT400-18AL	>30~60	390	250	18		12	130~180	铁素体
	>60~200	370	240	12		10		

(续表)

牌 号	铸件壁厚 (mm)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	A (%)	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> )		HB	主要金相组织
					室温 (23±5)℃	低温 (-20±2)℃		
					不 小 于			
QT400-15A	>30~60	390	250	15			130~180	铁素体
	>60~200	370	240	12				
QT500-7A	>30~60	450	300	7			170~240	铁素体+珠光体
	>60~200	420	290	5				
QT600-3A	>30~60	600	360	3			180~270	珠光体+铁素体
	>60~200	550	340	1				
QT700-2A	>30~60	700	400	2			220~320	珠光体
	>60~200	650	380	1				

注：① 字母“A”表示该牌号在附铸试块上测定力学性能。

表 1-99 球墨铸铁件的硬度及硬度牌号

硬度牌号	HB	主要金相组织	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	A(%)
			不 小 于		
QT-H330	280~360	贝氏体或回火马氏体	900	600	2
QT-H300	245~335	珠光体或回火组织	800	480	2
QT-H265	225~305	珠光体	700	420	2
QT-H230	190~270	珠光体+铁素体	600	370	3
QT-H200	170~230	铁素体+珠光体	500	320	7
QT-H330	160~210	铁素体	450	310	10
QT-H155	130~180	铁素体	400	250	15
QT-H150	130~180	铁素体	400	250	15

表 1-100 几种球墨铸铁的化学成分

	化 学 成 分 (质量分数,%)						
	C	Si	Mn	P	S	Mg	RE
珠光体球墨铸铁	3.6~3.9	2.0~2.5	0.5~0.6	≤0.10	≤0.03	0.03~0.06	0.02~0.05
铁素体球墨铸铁	3.6~3.9	2.5~3.1	0.3~0.5	0.05~0.07	≤0.03	0.03~0.06	0.02~0.05
贝氏体球墨铸铁	3.6~3.9	2.7~3.1	0.2~0.5	≤0.07	≤0.03	0.03~0.06	0.02~0.05

## (二) 球墨铸铁的热处理工艺

### 1. 高温石墨化退火

当球墨铸铁铸态组织中自由渗碳体 $\geq 1\%$ 时,为改善切削加工性能,提高塑性和韧性,须进行高温石墨化退火。高温石墨化退火加热温度为 $A_{c1}$ 上限+(30~50℃),一般为900~960℃。如果自由渗碳体 $\geq 5\%$ ,有碳化物形成元素存在时,应选择较高的温度950~960℃。当铸件中存在较多量的复合磷共晶时,则加热温度需提高至1000~1020℃。高温石墨化后的冷却根据所要求的基体组织而定,其工艺曲线见图1-13。保温后直接空冷可获得珠光体基体(曲线3),保温后随炉缓冷(曲线2)或在720~760℃等温(曲线1)可获得铁素体基体。

### 2. 低温石墨化退火

当球墨铸铁铸态组织中自由渗碳体 $<3\%$ 时,为了使共析渗碳体石墨化与粒状化、改善韧性,可进行低温石墨化退火。退火温度一般为 $720\sim 760^{\circ}\text{C}$ ,保温时间一般按每 $25\text{ mm}$ 厚度保温 $1\text{ h}$ 来计算。其工艺曲线见图1-14。而后空冷(曲线1)或在 $680\sim 700^{\circ}\text{C}$ 等温后空冷(曲线3),也可在炉冷至 $600^{\circ}\text{C}$ 后空冷(曲线2)。

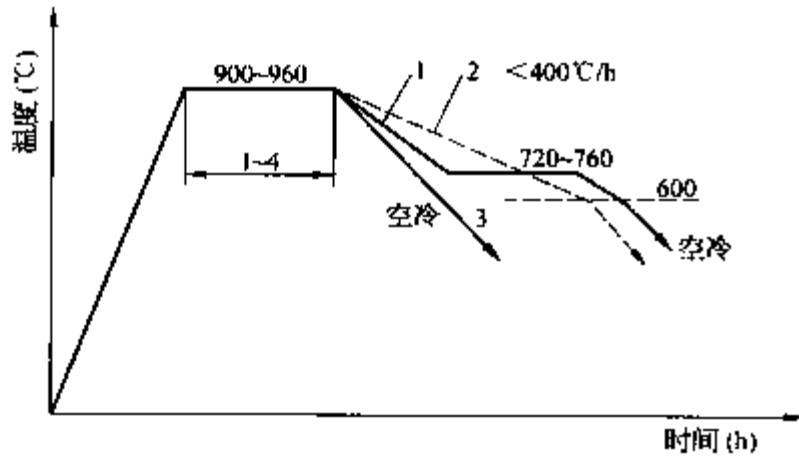


图1-13 高温石墨化退火工艺曲线

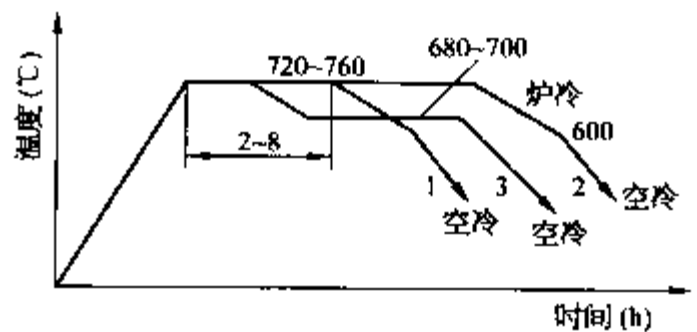


图1-14 低温石墨化退火工艺曲线

### 3. 高温完全奥氏体化正火

球墨铸铁高温完全奥氏体化正火温度一般为 $900\sim 940^{\circ}\text{C}$ ,使基体全部转变为奥氏体并均匀化,冷却后获得珠光体基体和少量牛眼状铁素体,从而改善切削性能,提高强度、硬度和耐磨性,或去除自由渗碳体。其工艺曲线见图1-15。当铸态组织中有过量的自由渗碳体或复合磷共晶时,可提高正火温度,采用阶段正火工艺,其工艺曲线见图1-16。

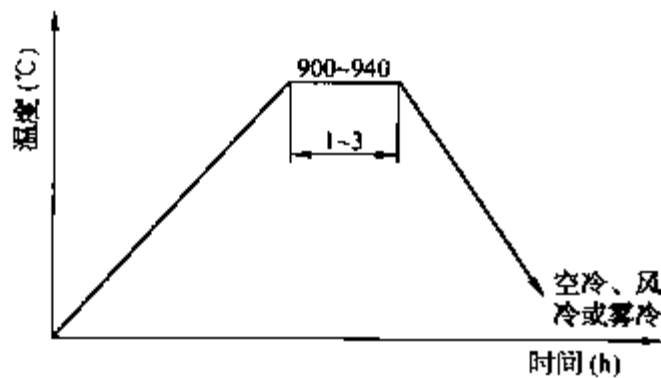


图1-15 高温完全奥氏体化正火工艺曲线

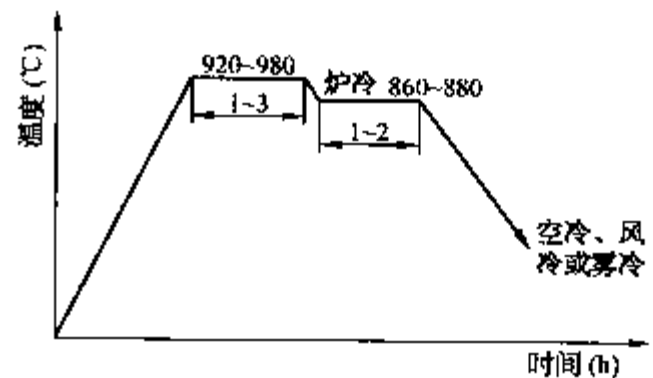


图1-16 高温完全奥氏体化阶段正火工艺曲线

球墨铸铁铸件正火后必须进行回火处理以改善韧性和消除内应力。回火工艺为 $550\sim 650^{\circ}\text{C}$ 保温 $2\sim 4\text{ h}$ 。

### 4. 中温部分奥氏体化正火

球墨铸铁中温部分奥氏体化正火是将铸件在共析转变温度内( $A_{c1} + 30\sim 50^{\circ}\text{C}$ )加热,基体中部分组织转变为奥氏体,剩下的铁素体正火后呈碎块状或条块状分散分布,使铸件具有较高的综合力学性能。中温部分奥氏体化正火工艺曲线见图1-17。当铸态组织中有过量的自由渗碳体或成分偏析较严重时采用阶段部分奥氏体化正火工艺,其工艺曲线见图1-18。

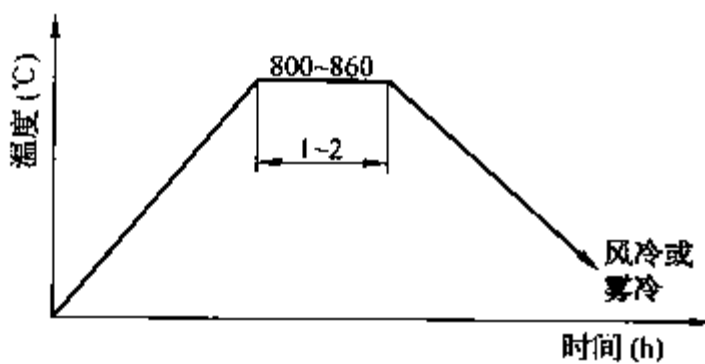


图1-17 中温部分奥氏体化正火工艺曲线

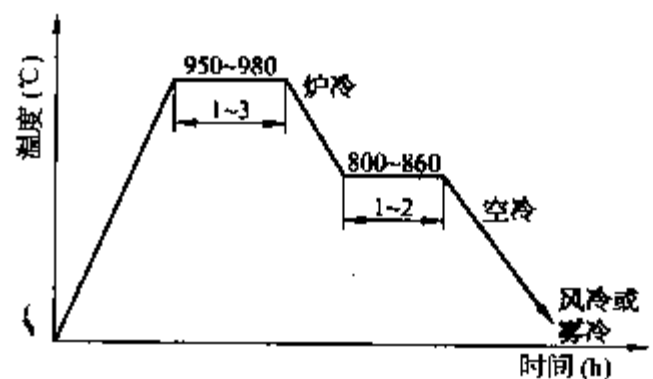


图1-18 中温部分奥氏体化阶段正火工艺曲线

球墨铸铁铸件部分奥氏体化正火后也必须进行回火处理以改善韧性和消除内应力。回火工艺为 500~600℃保温 2~4 h。

### 5. 淬火与回火

球墨铸铁淬火可以获得更高的耐磨性及良好的综合力学性能。淬火温度一般为 860~900℃,保温 1~4 h,油淬。如果铸件中存在过量的自由渗碳体时,可先进行高温石墨化处理,然后降至淬火温度保温后淬火。

球墨铸铁淬火后应及时回火。低温回火后具有高的硬度和耐磨性,回火温度为 140~250℃;高温回火可获得较高的综合力学性能,回火温度为 500~600℃;回火的保温时间一般按每 25 mm 保温 1 h 再加 1 h 来计算,而后空冷。

球墨铸铁等温淬火,可用于制造高强韧性能的零件,如齿轮、凸轮轴等。以 QT700-2 为例,经 880℃加热保温后,在约 260℃硝盐浴中等温冷却 45 min 后空冷,获得以下贝氏体为主的组织,硬度在 43~50HRC 范围。

## 三、可锻铸铁

### (一) 可锻铸铁的牌号与性能(GB/T9440—1988)

可锻铸铁的种类有黑心可锻铸铁、珠光体可锻铸铁和白心可锻铸铁,其牌号和性能见表 1-101 和表 1-102。

表 1-101 黑心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁的力学性能

牌 号		试样直径 (mm)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A$ (%)	HB
A	B		不 小 于			
KTH300-06		12 或 15	300		6	≤150
	KTH330-08		330		8	
KTH350-10			350	200	10	
	KTH370-12		370		12	
KTH450-06			450	270	6	150~200
KTH550-04			550	340	4	180~230
KTH650-02			650	430	2	210~260
KTH700-02			700	530	2	240~290

表 1-102 白心可锻铸铁的力学性能

牌 号	试样直径 (mm)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A$ (%)	HB
		不 小 于			不 大 于
KTB350-04	9	340		5	230
	12	350		4	
	15	360		3	
KTB380-12	9	320	170	15	200
	12	380	200	12	
	15	400	210	8	
KTB400-05	9	360	200	8	220
	12	400	220	5	
	15	420	230	4	
KTB450-07	9	400	230	10	220
	12	450	260	7	
	15	480	280	4	

## (二) 可锻铸铁的热处理工艺

可锻铸铁是白口铸铁的铸坯通过热处理后形成的,不同的热处理方法可得到不同类型的可锻铸铁。

### 1. 黑心可锻铸铁

黑心可锻铸铁是白口铸坯经石墨化退火后形成的,其基体组织为铁素体+团絮状石墨,黑心可锻铸铁热处理时在 300~350℃ 保温 3~5 h 进行孕育处理,然后升温至 900~950℃ 第一阶段石墨化处理,再冷却至 720~760℃ 第二阶段石墨化处理,石墨化处理结束后缓慢冷却至 650℃ 后空冷。其工艺曲线见图 1-19。

### 2. 珠光体可锻铸铁

珠光体可锻铸铁的热处理可采用三种不同热处理工艺:自由渗碳体石墨化后正火+回火、自由渗碳体石墨化后淬火+回火和自由渗碳体石墨化后珠光体球化退火,其工艺曲线见图 1-20、图 1-21 和图 1-22。

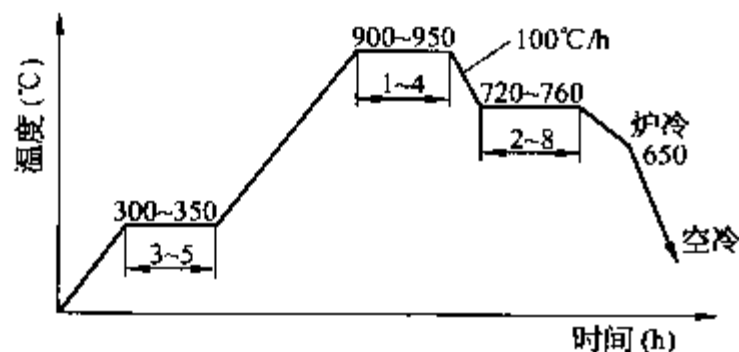


图 1-19 黑心可锻铸铁热处理工艺曲线

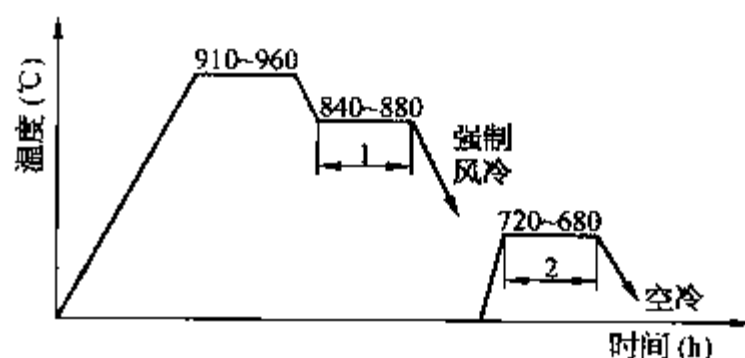


图 1-20 自由渗碳体石墨化后正火+回火工艺曲线

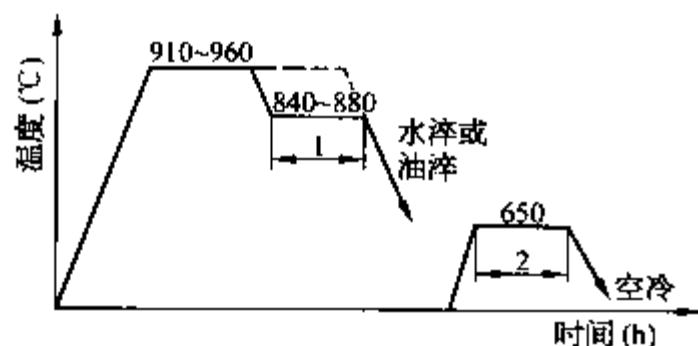


图 1-21 自由渗碳体石墨化后淬火+回火工艺曲线

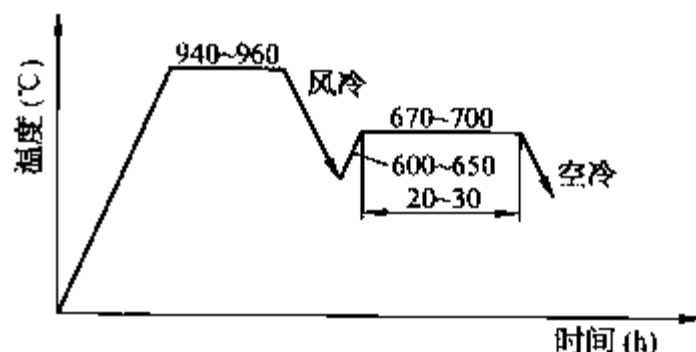


图 1-22 自由渗碳体石墨化后珠光体球化退火工艺曲线

### 3. 白心可锻铸铁

白心可锻铸铁是白口铸铁在氧化介质中经长时间的加热、退火,使铸坯脱碳后形成的,白心可锻铸铁热处理也称为脱碳退火。常用的氧化性介质及脱碳反应和加热温度见表 1-103。

表 1-103 生产白心可锻铸铁的脱碳剂及脱碳反应和加热温度

脱 碳 剂	脱 碳 反 应	加 热 温 度
8~15 mm 铁矿石或氧化铁屑+大粒砂与铸件一起装箱密封,填加量约为铸件重量的 10%~20%	$CO + FeO = CO_2 + Fe$ $CO + Fe_3O_4 = CO_2 + 3FeO$ $CO_2 + C = 2CO$	加热至 950~1 000℃ 保温后炉冷至 650~550℃ 出炉
$\phi(CO_2) \approx 4\%$ $\phi(CO) \approx 11\%$ $\phi(H_2) \approx 8\%$ $\phi(H_2O) \approx 5.5\%$ 其余为 $N_2$ 的气体、通入 $O_2$ 或 $H_2O$ 调节	$CO_2 + C = 2CO$ $H_2O + C = H_2 + CO$ $2CO + O_2 = 2CO_2$ $CO + H_2O = CO_2 + H_2$	加热至 1 050℃ 保温后炉冷至 550℃ 出炉

## 四、蠕墨铸铁

蠕墨铸铁的牌号与性能见表 1-104(JB/T4403—1999)。

表 1-104 蠕墨铸铁的牌号与性能

牌 号	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A$ (%)	硬度 HB	蠕化率 $V_G$ (%)	基体主要组织
	不 小 于				不 小 于	
RuT420	420	335	0.75	200~280	50	珠光体
RuT380	380	300	0.75	193~274		珠光体
RuT340	340	270	1.0	170~249		珠光体+铁素体
RuT300	300	240	1.5	140~217		铁素体+珠光体
RuT260	260	195	3.0	121~197		铁素体

## 五、耐磨铸铁

耐磨铸铁的牌号与性能见表 1-105(YB/T036.2—1992)。

表 1-105 耐磨铸铁的牌号与性能

牌 号	力 学 性 能		金 相 组 织
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	
MTCuMo-175	$\geq 175$	195~260	细小珠光体和中细片状石墨,珠光体含量大于 85%,磷共晶为细小网状并均匀分布,不允许有游离渗碳体
MTCrMoCu-235	$\geq 235$	200~250	石墨分散片状

## 六、抗磨铸铁

抗磨铸铁有抗磨白口铸铁和中锰抗磨球墨铸铁两大类,其牌号与性能分别见表 1-106 和表 1-107。抗磨白口铸铁的热处理规范见表 1-108。

表 1-106 抗磨白口铸铁的牌号与硬度 (摘自 GB/T8263—1999)

牌 号	硬 度					
	铸态或铸态并去应力处理		硬化态或硬化态并去应力处理		软化退火态	
	HRC	HB	HRC	HB	HRC	HB
KmTBNi4Cr2-DT	$\geq 53$	$\geq 550$	$\geq 56$	$\geq 600$		
KmTBNi4Cr2-GT	$\geq 53$	$\geq 550$	$\geq 56$	$\geq 600$		
KmTBCr9Ni5	$\geq 50$	$\geq 500$	$\geq 56$	$\geq 600$		
KmTBCr2	$\geq 46$	$\geq 450$	$\geq 56$	$\geq 600$	$\leq 41$	$\leq 400$
KmTBCr8	$\geq 46$	$\geq 450$	$\geq 56$	$\geq 600$	$\leq 41$	$\leq 400$
KmTBCr12	$\geq 46$	$\geq 450$	$\geq 56$	$\geq 600$	$\leq 41$	$\leq 400$
KmTBCr15Mo	$\geq 46$	$\geq 450$	$\geq 58$	$\geq 650$	$\leq 41$	$\leq 400$
KmTBCr20Mo	$\geq 46$	$\geq 450$	$\geq 58$	$\geq 650$	$\leq 41$	$\leq 400$
KmTBCr26	$\geq 46$	$\geq 450$	$\geq 56$	$\geq 600$	$\leq 41$	$\leq 400$

表 1-107 中锰抗磨球墨铸铁的牌号与性能 (摘自 GB/T3180-1982)

牌 号	Mn(%)	抗弯强度 $\sigma_{bb}$ (MPa)		挠度 $f$ (mm)		$A_{KU}$ (J)	硬度 HRC
		砂 型	金属型	砂 型	金属型		
		试验直径(mm)		支 距(mm)			
		30	50	300	500		
		不 小 于					
MQTMn6	5.5~6.5	510	392	3.0	2.5	6	44
MQTMn7	6.5~7.5	471	471	3.5	3.0	7	41
MQTMn8	7.5~9.0	432	491	4.0	3.5	8	38

表 1-108 抗磨白口铸铁的热处理规范

牌 号	软化退火处理	硬 化 处 理	去应力处理
KmTBNi4Cr2-DT KmTBNi4Cr2-CT		430~470℃保温 1~6 h, 出炉空冷或炉冷	250~300℃保温 4~16 h, 出炉空冷或炉冷
KmTBCr9Ni5		750~825℃保温 4~10 h, 出炉空冷或炉冷	250~300℃保温 4~16 h, 出炉空冷或炉冷
KmTBCr2	940~960℃保温 1~6 h, 缓冷至 750~780℃保温 4~6 h 缓冷至 600℃以下出炉空冷或炉冷	920~1000℃保温 1~6 h, 出炉空冷	200~300℃保温 2~6 h, 出炉空冷或炉冷
KmTBCr8	920~960℃保温 1~8 h, 缓冷至 750~780℃保温 4~6 h 缓冷至 600℃以下出炉空冷或炉冷	940~980℃保温 2~6 h, 出炉进入 260~320℃盐浴炉等温 2~6 h, 出炉空冷	200~300℃保温 2~6 h, 出炉空冷或炉冷
KmTBCr12		940~980℃保温 2~8 h, 出炉空冷	200~300℃保温 2~6 h, 出炉空冷或炉冷
KmTBCr15Mo	920~960℃保温 1~8 h, 缓冷至 750~780℃保温 4~6 h 缓冷至 600℃以下出炉空冷或炉冷	960~1000℃保温 2~6 h, 出炉空冷	200~300℃保温 2~8 h, 出炉空冷或炉冷
KmTBCr20Mo	960~1000℃保温 1~8 h, 缓冷至 700~750℃保温 4~10 h 缓冷至 600℃以下出炉空冷或炉冷	960~1020℃保温 2~6 h, 出炉空冷	200~300℃保温 2~8 h, 出炉空冷或炉冷
KmTBCr26		960~1060℃保温 2~6 h, 出炉空冷	

### 七、耐热铸铁

耐热铸铁的牌号、性能见表 1-109(GB/T9437-1988)。

表 1-109 耐热铸铁的牌号、性能

牌 号	抗拉强度 $R_m$ (MPa)	硬度 HB	使 用 条 件
RTC <sub>r</sub>	200	189~288	在空气炉中耐热温度到 550℃
RTC <sub>r</sub> 2	150	207~288	在空气炉中耐热温度到 600℃
RTC <sub>r</sub> 16	340	400~450	在空气炉中耐热温度到 900℃, 在室温及高温下有抗磨性, 耐硝酸腐蚀

(续表)

牌 号	抗拉强度 $R_m$ (MPa)	硬度 HB	使 用 条 件
RTSi5	140	160~270	在空气炉中耐热温度到 700℃
RQTSi4	480	187~269	在空气炉中耐热温度到 650℃, 含 Si 量上限时耐热到 750℃, 力学性能较 RQTSi5 好
RQTSi4Mo	540	197~280	在空气炉中耐热温度到 680℃, 含 Si 量上限时耐热到 780℃, 高温力学性能较好
RQTSi5	370	228~302	在空气炉中耐热温度到 800℃, 含 Si 量上限时耐热到 900℃
RQTAi4Si4	250	285~341	在空气炉中耐热温度到 900℃
RQTAi4Si5	200	302~363	在空气炉中耐热温度到 1050℃
RQTAi22	300	241~364	在空气炉中耐热温度到 1100℃, 抗高温硫蚀性好

## 八、高硅耐蚀铸铁

高硅耐蚀铸铁的牌号与性能见表 1-110(GB/T8491—1987)。

高硅耐蚀铸铁是一种较脆的材料,需要进行消除内应力的热处理,其消除内应力的热处理是铸件在红热状态下开箱,并迅速排除一切阻碍铸件自由收缩的机械阻力,清除浇冒口后将红热铸件直接装入高于 600℃的预先加热的热处理炉内,以不大于 45℃/h 的速度将铸件加热到 750~850℃保温 2~4 h,然后以不大于 45℃/h 的速度降温至不大于 100℃后出炉空冷。

表 1-110 高硅耐蚀铸铁的牌号与性能

牌 号	抗弯强度 $\sigma_{bb}$ (MPa)	挠度 $f$ (mm)	硬度 HRC
	不 小 于		不 大 于
STSi11Cu2CrR	190	0.80	42
STSi15R	140	0.66	48
STSi15Mo3R	130	0.66	48
STSi11Cr4R	130	0.66	48
STSi17R	130	0.66	48

## 第七节 有色金属的牌号、性能与热处理工艺

### 一、铝及铝合金

#### (一) 铝的性能

铝在地壳中蕴量丰富,纯铝具有较高导热性、导电性、抗腐蚀性及低密度等优点。铝合金的工艺性能优良,易于铸造、切削及加工成形。由于纯铝的强度低,一般不用作承载结构材料,纯铝的主要性能见表 1-111 和表 1-112。



表 1-111 纯铝的主要物理性能

名 称	量 值	名 称	量 值
原子序数	13	熔 点	660.24℃
原子量	26.9815	沸 点	2467℃
点阵常数(面心立方)	0.10495 nm	热导率(0~100℃)	22.609 W/(m·K)
原子直径	0.286 nm	电阻率(20℃)	2.67 μΩ·mm <sup>2</sup> /m
密度(25℃时)	2.698 g/cm <sup>3</sup>	膨胀系数(20~100℃)	23.8×10 <sup>-6</sup> ℃ <sup>-1</sup>

表 1-112 工业纯铝的低温力学性能

材料规格、状态	试验温度(℃)	抗拉强度 R <sub>m</sub> (MPa)	断后伸长率(%)
板材 (厚 15 mm) 退火态	+20	80	51
	-70	105	43
	-196	175	36

## (二) 工业纯铝的牌号及化学成分

### 1. 工业纯铝的分类

工业纯铝按加工方法不同可分为铸铝和变形铝,重熔用铝锭用化学元素符号“Al”加铝的质量分数表示,如 Al99.99 表示铝的质量分数不小于 99.99% 的重熔铝锭。

纯铝牌号为 1XXX 系列,牌号最后两位数字表示最低的质量分数(指小数点后的两位数字)如 1A95 表示纯铝中铝的质量分数不小于 99.95%;1060 表示纯铝中铝的质量分数不小于 99.60%。表 1-113 列举了工业纯铝的牌号及化学成分。

表 1-113 铝的纯度及杂质含量

(质量分数,%)

类 别	新牌号	旧牌号	Al≥	杂 质					总和
				Fe≤	Si≤	Fe+Si≤	Cu≤	其他≤	
工 业 高纯铝	1A99	LG5	99.99	0.0030	0.0025	—	0.005	—	0.010
	1A97	LG4	99.97	0.015	0.015	—	0.005	—	0.03
	1A93	LG3	99.93	0.04	0.04	—	0.01	—	0.07
	1A90	LG2	99.90	0.06	0.06	—	0.01	—	0.10
	1A85	LG1	99.85	0.10	0.08	—	0.01	—	0.15
工 业 纯 铝	1070A	L1	99.7	0.16	0.16	0.26	0.01	—	0.30
	1060	L2	99.6	0.25	0.20	0.36	0.01	—	0.40
	1050A	L3	99.5	0.30	0.30	0.45	0.015	—	0.50
	1035	L4	99.3	0.35	0.40	0.60	0.05	—	0.70
	1100	L5	99.0	0.50	0.50	0.90	0.05	—	1.0
		L6	98.8	0.50	0.55	1.0	0.10	Zn0.1, Mn0.1 Mg0.1, 其他 0.1	1.2

### 2. 工业纯铝的热处理

(1) 为消除因焊接、切削、冷变形造成的残留应力,提高组织稳定性、减少应力腐蚀倾向,要进行去应力退火。退火温度低于再结晶开始温度,在 150~250℃ 之间,一般保温时间为 1~3 h,保温后缓慢冷却。

(2) 为了细化晶粒,更充分地消除应力,降低硬度,便于加工,要进行再结晶退火。温度为 350~400℃。保温时间依厚度而定,当厚度 $\leq 6$  mm 时,热透即可;当厚度 $> 6$  mm 时,保温 30 min,随后空冷或炉冷。经退火的纯铝板  $R_{p0.2}$  为 30~50 MPa,  $A$  为 35%~40%。

### (三) 变形铝合金

在纯铝中加入适量的铜、锰、硅、镁、锌、镍、铁等元素,可以提高纯铝的比强度、比刚度,有的还可以通过热处理来获得所需的力学性能。按生产工艺方法不同,铝合金可以分变形铝合金和铸造铝合金两大类。

变形铝合金按性能及用途可分为硬铝、超硬铝、锻铝及防锈铝。新的牌号命名法是按合金中的主要合金元素进行区分,如表 1-114 所示。

表 1-114 铝及铝合金牌号系列表

组 别	牌 号 系 列
纯 铝	1×××
以铜为主要合金元素的铝合金	2×××
以锰为主要合金元素的铝合金	3×××
以硅为主要合金元素的铝合金	4×××
以镁为主要合金元素的铝合金	5×××
以镁和硅为主要合金元素,并以 $Mg_2Si$ 相为强化相的铝合金	6×××
以锌为主要合金元素的铝合金	7×××
以其他合金元素为主要合金元素的铝合金	8×××
备用合金组	9×××

#### 1. 常用变形铝合金牌号、成分、力学性能及用途

(1) 防锈铝。防锈铝是由铝镁(Al-Mg)系合金(牌号系列 5×××)和铝锰(Al-Mn)系合金(牌号系列为 3×××)组成的。常用防锈铝的化学成分、力学性能及用途见表 1-115。

防锈铝不能通过热处理强化。防锈铝均有较好的抗蚀能力及一定的强度、塑性。加入镁可适当提高强度,加入锰能提高抗蚀能力。适用于进行压力加工、铆接和焊接,但防锈铝有冷作硬化现象,切削加工性能差。常用于制造铆钉及冷变形容容器。

表 1-115 常用防锈铝的化学成分、力学性能及用途

新牌号	旧牌号	化学成分(质量分数,%)			力学性能(不低于)			用 途
		Mg	Mn	其他	$R_m$ (MPa)	$A$ (%)	HB	
5A02	LF2	2.0~2.8	0.15~0.4 (或 Cr)	—	200	17	45	焊接、冲压件及各种骨架中强度零件
5A05	LF5	4.8~5.5	0.3~0.6	—	220	15	65	铆钉、抗蚀零件
5B05	LF10	4.7~5.7	0.2~0.6	—	270	23	70	用于铆接铝合金或镁合金的铆钉
3A21	LF21	0.05	1.0~1.6	—	130	21	30	油箱、汽油和润滑油导管、小负荷零件及铆钉

(2) 硬铝。硬铝是铝铜镁(Al-Cu-Mg)系合金。硬铝可以通过固溶处理和时效来提高强度和硬度,并具有良好的切削加工性能,硬铝的耐腐蚀性差,尤其不耐海水腐蚀,故经常采用纯铝或防锈铝包层处理。常用硬铝的化学成分、力学性能及用途见表 1-116。

表 1-116 常用硬铝的化学成分、力学性能及用途

新牌号	旧牌号	化学成分(质量分数,%)				力学性能(不低于)			用途
		Cu	Mg	Mn	其他	$R_m$ (MPa)	A(%)	HB	
2A01	LY1	2.2~3.0	0.25~0.5	—	—	300	24	70	中等强度、工作温度不超过 100℃ 的铆钉
2A04	LY4	3.2~3.7	2.1~2.6	0.5~0.8	Ti = 0.05~0.40 Be = 0.001~0.01	460	10	100	工作温度为 120~250℃ 的结构和铆钉
2A10	LY10	3.9~4.5	0.15~0.3	0.3~0.5	—	400	10	100	高强度结构的铆钉
2A11	LY11	3.8~4.8	0.4~0.8	0.4~0.8	—	400	11~14	115	梁、隔框、长桁、滑轮、铆钉等
2A12	LY12	3.8~4.9	1.2~1.8	0.3~0.9	—	455	8~14	130	受力零件、发电机槽楔、机身蒙皮、铆钉等

(3) 锻铝。锻铝是铝镁硅铜(Al-Mg-Si-Cu)系或铝铜镁铁镍(Al-Cu-Mg-Fe-Ni)系合金,牌号主要为 2××× 系列。常用锻铝的化学成分、力学性能及用途见表 1-117。

锻铝的特点是热塑性好,适宜进行锻造加工,用于锻制形状复杂的零件,如压汽机的叶轮、发动机风扇的叶片、飞机操纵系统的摇臂、支架及大型模锻零件。

锻铝可以热处理强化,但固溶处理后应立即进行时效处理,否则会降低时效强化的效果。

表 1-117 常用锻铝的化学成分、力学性能及用途

新牌号	旧牌号	化学成分(质量分数,%)					力学性能						用途
		Cu	Mg	Si	Mn	其他	$R_m$ (MPa)		A(%)		HB		
							软	硬	软	硬	软	硬	
6A02	LD2	0.2~0.6	0.45~0.9	0.5~1.2	0.15~0.35 或 Cr	—	120	330	30	16	30	95	模锻件、冲压件、管子、直升机螺旋桨叶片等
2A50	LD5	1.8~2.6	0.4~0.8	0.7~1.2	0.4~0.8	—	—	120	—	13	—	105	形状复杂的零件、冲压件、发动机零件、铆钉等
2A70	LD7	1.9~2.5	1.4~1.8	0.35~0.5	—	Ti = 0.02~0.10 Ni = 0.9~1.5 Fe = 0.9~1.5	—	415	—	13	—	105	高温零件,如活塞、叶轮等
2A14	LD10	3.9~4.8	0.4~0.8	0.6~1.2	0.4~1.0	—	—	480	—	10	—	133	高负荷零件,如发动机叶片等

(4) 超硬铝。超硬铝是铝铜镁锌(Al-Cu-Mg-Zn)系合金。常用超硬铝的化学成分、力学性能及用途见表 1-118。

超硬铝经固溶处理和时效后,其强度、硬度比硬铝更高,可达 500~700 MPa。屈服强度和抗拉强度已接近高强度钢,其他性能与硬铝相似,但耐热性略差。常加工成板、棒、管、线或锻件,用于飞机大梁、桁条、加强框、接头等。

表 1-118 常用超硬铝的化学成分、力学性能及用途

新牌号	旧牌号	化学成分(质量分数,%)						力学性能			用途
		Cu	Mg	Mn	Zn	Cr	Al	$R_m$ (MPa)	A (%)	HB	
7A04	LC4	1.4~ 2.0	1.8~ 2.8	0.2~ 0.6	5.0~ 7.0	0.1~ 0.25	余量	600	8	150	受力件,如梁、桁条、加强框、蒙皮、接头等
7A06	LC6	2.2~ 2.8	2.5~ 3.2	0.2~ 0.5	7.6~ 8.6	0.1~ 0.25	余量	680	7	150	高强度应力集中较小的结构件

## 2. 变形铝合金的退火

(1) 去应力退火。目的是消除因切削、冷变形、焊接等原因造成的残留应力,提高组织及性能稳定性,降低应力腐蚀倾向。去应力退火温度低于再结晶开始温度,保温后缓慢冷却。去应力退火主要用于防锈铝合金和工业纯铝。表 1-119 列出几种防锈铝合金的去应力退火工艺制度。

表 1-119 防锈铝去应力退火工艺制度

新牌号	旧牌号	退火温度(°C)	保温时间(min)	
			厚度<6 mm	厚度>6 mm
5A02	LF2	150~180	60~120	
5A03	LF3	270~300	60~120	
5A04	LF21	250~280	60~150	60~150

(2) 再结晶退火。目的是细化晶粒,充分消除残留应力,降低硬度,提高塑性便于变形加工。退火加热温度高于再结晶开始温度,保温后缓慢冷却。表 1-120 列出变形铝合金退火工艺制度。

表 1-120 变形铝合金再结晶退火工艺制度

新牌号	旧牌号	退火温度(°C)	保温时间(min)		冷却方法
			厚度<6 mm	厚度>6 mm <sup>①</sup>	
	工业纯铝	350~400	热透为止	30	空冷或炉冷
5A04	LF21	350~420 <sup>②</sup>			
5A02	LF2	350~400			
5A03	LF3	350~400			
5A05	LF5	310~335			
5A06	LF6	310~335			
2A11	LY11	350~370	40~60	60~90	炉冷
2A12	LY12	350~370			
2A16	LY16	350~370			
6A02	LD2	350~370			
2A50	LD5	350~400			
2B50	LD6	350~400			
2A14	LD10	350~370			
7A04	LC4	370~390			

注:表中所列是在空气循环炉中加热的制度。盐浴加热、保温时间可按表中数据缩短 1/3,静止空气炉则应增加 1/2。

① 工件厚度>10 mm 时,在硝酸盐槽内加热,工件每增加 1 mm 应增加 2 min,在空气循环炉中则应增加 3 min。

② 5A04 在硝酸盐槽中加热时,加热温度为 450~500°C。

## 3. 变形铝合金的固溶和时效处理

变形铝合金经过固溶处理后,过饱和固溶体经自然时效(在常温下放置)或人工时效(在高于室温的温度下保温)后,将发生脱溶沉淀,形成各种过渡相或平衡的次生相。

(1) 变形铝合金固溶处理加热温度。变形铝合金固溶处理加热及熔化开始温度见表 1-121。温度的确定首先是要使强化相最大限度地溶入固溶体,同时防止过烧或熔化,见表 1-122。

表 1-121 变形铝合金固溶处理加热及熔化开始温度

新牌号	旧牌号	强化相(括号中为少量的)	加热温度(°C)	熔化开始温度(°C)
2A01	LY1	CuAl <sub>2</sub> , Mg <sub>2</sub> Si	495~505	535
2A02	LY2	Al <sub>2</sub> CuMg(CuAl <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> Mn <sub>2</sub> Cu)	495~506	510~515
2A06	LY6	Al <sub>2</sub> CuMg(CuAl <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> Mn <sub>2</sub> Cu)	503~507	518
2A10	LY10	CuAl <sub>2</sub> (Mg <sub>2</sub> Si)	515~520	540
2A11	LY11	CuAl <sub>2</sub> , Mg <sub>2</sub> Si(Al <sub>2</sub> CuMg)	500~510	514~517
2A12	LY12	CuAl <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> CuMg(Mg <sub>2</sub> Si)	495~503	506~507
2A16	LY16	CuAl <sub>2</sub> , Al <sub>12</sub> Mn <sub>2</sub> Cu(TiAl <sub>3</sub> )	528~545	593
2A17	LY17	CuAl <sub>2</sub> , Al <sub>12</sub> Mn <sub>2</sub> Cu(TiAl <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> CuMg)	520~530	540
6A02	LD2	Mg <sub>2</sub> Si, Al <sub>2</sub> CuMg	515~530	595
2A50	LD5	Mg <sub>2</sub> Si, Al <sub>2</sub> CuMg, Al <sub>2</sub> CuMgSi	503~525	>525
2A70	LD7	Al <sub>2</sub> CuMg, Al <sub>9</sub> FeNi	525~595	—
2A80	LD8	Al <sub>2</sub> CuMg, Mg <sub>2</sub> Si, Al <sub>9</sub> FeNi	525~540	—
2A90	LD9	Al <sub>2</sub> CuMg, Mg <sub>2</sub> Si, Al <sub>9</sub> FeNi, AlCu <sub>3</sub> Ni	510~525	—
2A14	LD10	CuAl <sub>2</sub> , Mg <sub>2</sub> Si, Al <sub>2</sub> CuMg	495~506	509
7A03	LC3	MgZn <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> Zn <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> CuMg)	460~470	>500
7A04	LC4	MgZn <sub>2</sub> (Al <sub>2</sub> Mg <sub>2</sub> Zn <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> CuMg, Mg <sub>2</sub> Si)	465~485	>500

表 1-122 变形铝合金制品实测过烧温度

新牌号	旧牌号	种类	规格(mm)	变形度(%)	加热方式	保温时间(min)	过烧温度(°C)
2A02	LY2	棒材	φ20	99.4	强制空气循环炉	40	515
2A06	LY6	板材	3.0	54.0	盐浴炉	20	515
		棒材	3.0	54.0	盐浴炉	30	510
2A11	LY11	板材	3.0	54.0	盐浴炉	20	514
		棒材	φ14	94.5	强制空气循环炉	40	514
		冷拉管材	φ110×3.0	9.0	盐浴炉	20	512
2A12	LY12	板材	2.0	60.0	盐浴炉	17	505~507
		棒材	φ15	94.3	强制空气循环炉	40	505
		冷拉管材	φ40×1.5	73.3	盐浴炉	20	507
		冷拉管材	φ80×2.0	24.0	盐浴炉	20	505

(续表)

新牌号	旧牌号	种类	规格(mm)	变形度(%)	加热方式	保温时间(min)	过烧温度(°C)
2A16	LY16	板材	1.6	53.0	盐浴炉	17	547
		棒材	φ12	95.0	强制空气循环炉	40	547
2A17	LY17	棒材	φ30	—	盐浴炉	30	535
6A02	LD2	板材	4.0	40	盐浴炉	27	535
		棒材	φ22	95	强制空气循环炉	40	565
2A50	LD5	棒材	φ22	95	强制空气循环炉	40	545

表 1-123、表 1-124 列出几种变形铝合金在盐浴炉及空气炉中固溶加热的保温时间。

变形铝合金固溶处理的冷却必须有足够的速度以防止析出粗大的过剩相,并尽可能减少畸变和开裂的危险,一般情况下多采用 10~30℃ 的水进行冷却,形状复杂的可采用 30~50℃ 的水,特殊情况下水温可提高到 80℃。在冷却过程中应严格控制工件从加热炉转移至冷却槽的时间。一般规定铝合金厚度小于 4 mm 时,淬火转移时间不得超过 30 s。厚度大的或成批工件同时淬火时,转移时间可延长,对硬铝、锻铝可延长 20~30 s;对超硬铝可延长 25 s。也可用有机聚合物水溶液作冷却剂。

表 1-123 变形铝合金在盐浴中固溶加热的保温时间

合 金 牌 号		板材厚度 棒材直径(mm)	保温时间(min)	板材厚度 棒材直径(mm)	保温时间(min)
新	旧				
2A06 2A11 2A12	包铝板材: LY6 LY11 LY12	0.3~0.8	9	6.1~8.0	35
		1.0~1.5	10	8.1~12.0	40
		1.6~2.5	17	12.1~25.0	50
		2.6~3.5	20	25.1~32.0	60
		3.6~4.0	27	32.1~38.0	70
		4.1~6.0	32		
2A11 2A12	不包铝板材: LY11 LY12	0.3~0.8	12	2.6~3.5	30
		0.9~1.2	18	3.6~5.0	35
		1.3~2.0	20	5.1~6.0	50
		2.1~2.5	25	>6.0	60
6A02 7A04	LD2 LC4 不包铝板材	0.3~0.8	9	3.1~3.5	27
		1.0~1.5	12	3.6~4.0	32
		1.6~2.0	17	4.1~5.0	35
		2.1~2.5	20	5.1~6.0	40
		2.6~3.0	22	>6.0	60

表 1-124 几种变形铝合金在空气炉中固溶加热的保温时间

制品种类	棒材、线材直径,型材锻件厚度(mm)	保温时间 (min)			
		制品长度 小于 13 m		制品长度 大于 13 m	
铝合金棒材、型材	<3.0		30		45
	3.1~5.0		45		60
	5.1~10.0		60		75
	10.1~12.0		75		90
	12.1~30.0		90		100
	30.1~40.0		105		135
	40.1~60.0		150		150
	60.1~100.0		180		180
	>100.0		210		210
2A08 线材	所有尺寸	60			
铝合金锻件	<30	75			
	31~50	100			
	51~100	120~150			
	101~150	180~210			

(2) 时效处理温度和时间。不同的变形铝合金经固溶处理后,常用的时效制度见表 1-125。

表 1-125 常用变形铝合金时效制度

牌 号		制品种类	时效温度 (°C)	时效时间 (h)
新	旧			
2A02	LY2	管、棒、型、锻件	165~170	16
2A06	LY6	板 材	室 温	≥96
		板 材	125~135	10
2A11	LY11	板 材	室 温	≥96
2A12	LY12	板 材	室 温	≥96
2A16	LY16	板 材	160~170	14
		管、棒、型	160~170	16
2A17	LY17	板 材	室 温	≥96
7A04	LC1	板 材	125~135	16
		管、棒、型	138~143	16
		锻 件	135~140	16
7A09	LC9	板 材	125~135	16
7A14	LC10	板 材	125~135	16
		线 材	150~160	8
6A50	LD5	板 材	室 温	≥96
		管、棒、型	150~155	3
		锻 件	153~160	6~12

(续表)

牌 号		制 品 种 类	时效温度 (°C)	时效时间 (h)
新	旧			
2B50	LD6	管、棒、型	150~155	3
		锻 件	153~160	6~12
2A70	LD7	管、棒、型	185~190	8
		锻 件	185~190	10~11
2A80	LD8	管、棒、型	170~175	8
		锻 件	160~180	8~12
7A90	LD9	管、棒、型	165~170	8
2A14	LD10	板 材	室 温	≥96
		板 材	155~165	12
		管、棒、型	150~155	8

(3) 常用变形铝合金锻件的热处理制度和力学性能见表 1-126。

表 1-126 变形铝合金锻件的热处理制度和力学性能(工厂标准)

牌 号		热 处 理 状 态 <sup>①</sup>		固 溶 加 热 温 度(°C)	加 热 温 度(°C)	时 效 保 温 时 间 (h)	试 样 状 态	机 械 性 能(纵 向)		
新	旧	新	旧					$R_m$ (MPa)	A (%)	HB
2A11	LY11	T4	CZ	500±5	室温 10~40	≥96 (人工时效(165±5)°C,保温 6 h)	锻件	≥350	≥10	≥90
2A12	LY12	T4	CZ	500±5	室温 10~40	≥96 (人工时效(190±5)°C,保温 9/12 h)	棒	≥420	≥10	≥95
7A04	LC4	T6	CS	470±5	140±5	16(固溶后 4 h 内或固溶后搁置 4~5 天后再时效)	锻件	≥440	≥6	≥120
6A02	LD2	T6	CS	520±5	160±5	10~15 (固溶后<6 h 内时效)	锻件	≥275	≥10	≥85
2A50	LD5	T6	CS	515±5	160±5	12~15 (固溶后<6 h 内时效)	锻件	≥360	≥8	≥95
2B50	LD6	T6	CS	510±5	155±5	8~15	锻件	≥360	≥8	≥95
2A70	LD7	T6	CS	535±5	190±5	10~15	棒	≥350	≥8	≥100
2A80	LD8	T6	CS	525±5	170±5	12~16	锻件	≥350	≥3	≥100
2A90	LD9	T6	CS	515±5	170±5	15~18	锻件	≥350	≥4	≥95
2A14	LD10	T6	CS	500±5	160±5	12~15	锻件	≥410	≥8	≥120

注: ① T6(CS)——固溶+人工时效, T4(CZ)——固溶+自然时效。

(4) 铝合金铆钉线材的热处理制度见表 1-127。



表 1-127 铝合金铆钉线材的热处理制度

合金牌号	铆钉直径 (mm)	固溶处理(盐浴)		时 效		铆接状态,允许铆接时间
		温度(℃)	保温时间(min)	温度(℃)	保温时间	
2A08 (LY8)	2~5 6~9.5	500±5	20 30	室温	不小于 4 昼夜	一般用于新固溶后 2 h 内铆完 亦可在自然时效 4 昼夜后铆接
2A10 (LY9)	2~5 6~9.5	495±5	20 30	室温	不小于 4 昼夜	固溶后 1 h 之内铆完
2A10 (LY10)	2~5 6~9.5	515±5	30~40 40~50	75±5	24 h	时效后铆接时间不限,亦可在 自然时效状态铆接
7A03 (LC3)	2~5	470±5	30~40	分级时效 第一阶段: 515±5	3 h	固溶时效状态铆接时间不限
	6~9.5		40~50	第二阶段: 515±5	3 h	
5A02 (LF02)	退火: 300~400℃保温 1~3 h, 水冷或空冷(空气循环炉加热)					铆接时间不限
5B05 (LF10)	退火: 300~360℃保温 1~2 h, 空冷(空气循环炉加热)					铆接时间不限

## 4. 变形铝合金新旧牌号对照

我国变形铝合金新旧牌号对照见表 1-128。

表 1-128 变形铝及铝合金的新旧牌号对照(摘自 GB/T3190—1996)

新牌号	旧牌号	新牌号	旧牌号	新牌号	旧牌号
1A99	原 LG5	1035	代 L4	5019	
1A97	原 LG4	1100	代 L5-1	5050	
1A95		1145		5251	
1A93	原 LG3	1200	代 L5	5052	
1A90	原 LG2	1235		5154	
1A85	原 LG1	1350		5154A	
1080		2A01	原 LY1	5454	
1080A		2A02	原 LY2	5554	
1070		2A04	原 LY4	5754	
1070A	代 L1	2A06	原 LY6	5056	原 LFS-1
1370		2A10	原 LY10	5356	
1060	代 L2	2A11	原 LY11	5456	
1050		2B11	原 LY8	5082	
1050A	代 L3	5A43	原 LT43	2A12	原 LY12
1A30	原 LA-1	5A66	原 LT66	2B12	原 LY9
1A50	原 LB2	5005		2A13	原 LY13

(续表)

新牌号	旧牌号	新牌号	旧牌号	新牌号	旧牌号
2A14	原 LD10	5183		4047A	
2A16	原 LY16	6061	原 LD30	5A01	曾用 2101、LF15
2B16	曾用 LY16-1	6063	原 LD31	5A02	原 LF2
2A17	原 LY17	6063A		5A03	原 LF3
2A20	曾用 LY20	6070	原 LD2-2	5A05	原 LF5
2A21	曾用 214	6181		5B05	原 LF10
2A25	曾用 225	6082		5A06	原 LF6
2A49	曾用 149	7A01	原 LB1	5B06	原 LF14
2A50	原 LD5	7A03	原 LC3	5A12	原 LF12
2B50	原 LD6	7A04	原 LC4	5A13	原 LF13
2A70	原 LD7	7A05	曾用 705	5A30	曾用 2103、LF16
2B70	曾用 LD7-1	7A09	原 LC9	5A33	原 LF33
2A80	原 LD8	7A10	原 LC10	5A41	原 LT41
2A90	原 LD9	2124		7A15	曾用 LC15、157
2004		3A21	原 LF21	7A19	曾用 919、LC19
2011		3003		7A31	曾用 183-1
2014		3103		7A33	曾用 LB733
2014A		3004		7A52	曾用 LC52、5210
2214		3005		7003	原 LC12
2017		3105		7005	
2017A		4A01	原 LT1	7020	
2117		4A11	原 LD11	7022	
2218		4A13	原 LT13	7050	
2618		4A17	原 LT17	7075	
2219	曾用 LY19、147	4004		7475	
2024		4032		8A06	原 L6
5182		4043		8011	曾用 LT98
5083	原 LF4	4043A		8090	
5086		4047			

备注: 1. “原”是指化学成分与新牌号等同,且都符合 GB/T3190—1982 规定的旧牌号。

2. “代”是指与新牌号的化学成分相近似,且符合 GB/T3190—1982 规定的旧牌号。

3. “曾用”是指已经鉴定,工业生产时曾经用过,但没有收入 GB/T3190—1982 中的牌号。

#### 5. 我国变形铝及铝合金的状态代号和表示方法

根据 GB/T16475—1996 标准规定,基础状态代号用一个英文大写字母表示。细分状态代号采用基础状态代号后跟一位或多位阿拉伯数字表示。

1) 基础状态代号 基础状态代号分为 5 种,如表 1-129 所示。

表 1-129 基础状态代号

代号	F	O	H	W	T
名称	自由加工状态	退火状态	加工硬化状态	固溶热处理状态	热处理状态(不同于 F、O、H 状态)

## 2) 细分状态代号

(1) H(加工硬化)的细分状态。即在字母 H 后面添加两位阿拉伯数字(称做 H××状态),或三位阿拉伯数字(称做 H×××状态)表示 H 的细分状态。

H××状态: H 后面的第一位数字表示获得该状态的基本处理程序。

H1——单纯加工硬化状态。

H2——加工硬化及不完全退火的状态。

H3——加工硬化及稳定化处理的状态。

H4——加工硬化及涂漆处理的状态。

H 后面的第二位数字表示产品的加工硬化程度。数字 8 表示硬状态,通常用 O 状态(退火)的最小抗拉强度与表 1-130 规定的强度差值之和来规定 H×8 状态的最小抗拉强度值。对于 O 和 H×8 状态之间的状态,用 H×代号后分别添加从 1~7 的数字来表示,在 H×后添加数字 9 表示比 H×8 加工硬化程度更大的超硬状态。各种 H××细分状态代号及对应的加工硬化程度如表 1-131 所示。

H×××状态: H×××状态代号如下所示。

H111——适用于最终退火后又进行了适量的加工硬化,但加工硬化程度又不及 H11 状态的产品。

H112——适用于热加工成型的产品。该状态产品的力学性能有规定要求。

H116——适用于镁含量 $\geq 4.0\%$ 的 5×××系合金制成的产品。这些产品具有规定的力学性能和抗剥落腐蚀性能要求。

表 1-130 H×8 状态与 O 状态最小抗拉强度的差值

O 状态的最小抗拉强度 (MPa)	H×8 状态与 O 状态的最小抗拉强度的差值 (MPa)	O 状态的最小抗拉强度 (MPa)	H×8 状态与 O 状态的最小抗拉强度的差值 (MPa)
$\leq 40$	55	165~200	100
45~60	65	205~240	105
65~80	75	245~280	110
85~100	82	285~320	115
105~120	90	$\geq 325$	120
125~160	95		

表 1-131 H××细分状态代号与加工硬化程度

细分状态代号	加工硬化程度
H×1	抗拉强度极限为 O 与 H×2 状态的中间值(1/8)
H×2	抗拉强度极限为 O 与 H×4 状态的中间值(1/4)
H×3	抗拉强度极限为 H×2 与 H×4 状态的中间值
H×4	抗拉强度极限为 O 与 H×8 状态的中间值(1/2)
H×5	抗拉强度极限为 H×4 与 H×6 状态的中间值
H×6	抗拉强度极限为 H×4 与 H×8 状态的中间值(3/4)
H×7	抗拉强度极限为 H×6 与 H×8 状态的中间值
H×8	硬状态
H×9	超硬状态,最小抗拉强度极限值超 H×8 状态至少 10 MPa

注:按表中确定值不是以 O 或 5 结尾时,应修正至 O 或 5 结尾的相邻较大值。

(2) T(热处理)的细分状态。即在字母 T 后面添加一位或多位阿拉伯数字表示 T 的细分状态。

T×状态: 在 T 后面添加 0~10 的阿拉伯数字, 表示的细分状态, 称做 T×状态, 如表 1-132 所示。T 后面的数字表示对产品的基本处理程序。

表 1-132 T×细分状态代号说明与应用

状态代号	说明与应用
T0	固溶热处理后, 经自然时效再通过冷加工的状态
T1	由高温成型过程冷却, 然后自然时效至基本稳定的状态
T2	由高温成型过程冷却, 经冷加工后自然时效至基本稳定的状态
T3	固溶热处理后进行冷加工, 再经自然时效至基本稳定的状态
T4	固溶热处理后, 然后自然时效至基本稳定的状态
T5	由高温成型过程冷却, 然后进行人工时效的状态
T6	固溶热处理后进行人工时效的状态
T7	固溶热处理后进行过时效的状态
T8	固溶热处理后经冷加工, 然后进行人工时效的状态
T9	固溶热处理后进行人工时效, 然后进行冷加工的状态
T10	由高温成型过程冷却后, 进行冷加工, 然后人工时效的状态

T××状态及 T×××状态(消除应力状态除外): 在 T×状态代号后面再添加一位阿拉伯数字称做 T××状态, 或添加两位阿拉伯数字称做 T×××状态, 表示经过了明显改变产品特性(如力学性能、抗腐蚀性能等)的特定工艺处理的状态, 如表 1-133 所示。

表 1-133 T××及 T×××细分代号说明与应用

状态代号	说明与应用
T42	适用于自 O 或 F 状态固溶热处理后, 自然时效到充分稳定状态的产品, 也适用于需方对任何状态的加工产品热处理后, 力学性能达到 T42 状态的产品
T62	适用于自 O 或 F 状态固溶热处理后, 进行人工时效的产品, 也适用于需方对任何状态的加工产品热处理后, 力学性能达到 T62 状态的产品
T73	适用于固溶热处理后, 经过时效以达到规定的力学性能和抗应力腐蚀性能指标的产品
T74	与 T73 状态定义相同。该状态的抗拉强度大于 T73 状态, 但小于 T76 状态
T76	与 T73 状态定义相同。该状态的抗拉强度分别高于 T73、T74 状态, 抗应力腐蚀断裂强度分别低于 T73、T74 状态, 但其抗剥落腐蚀性能仍较好
T7×2	适用于自 O 或 F 状态固溶热处理后, 进行人工过时效处理, 力学性能及抗腐蚀性能高于 T7×状态的产品
T81	适用于固溶热处理后, 经 1%左右的冷加工变形提高强度, 然后进行人工时效的产品
T87	适用于固溶热处理后, 经 7%左右的冷加工变形提高强度, 然后进行人工时效的产品

(3) 消除应力状态。在上述 T×或 T××或 T×××状态代号后面添加或“510”或“511”或“54”, 见表 1-134。

W 的消除应力状态, 正如 T 的消除应力状态代号表示方法, 可在 W 状态代号后面添加相同的数字(如 51、52、54), 以表示不稳定的固溶热处理及消除应力状态。

表 1-134 消除应力状态代号说明与应用

状态代号	说明与应用
T×51 T××51 T×××51	适用于固溶热处理或自高温成型过程冷却后,按规定量进行拉伸的厚板、轧制或冷精整的棒材以及模锻件、锻环或轧制环,这些产品拉伸后不再进行矫直 厚板的永久变形量为 1.5%~3%;轧制或冷精整棒材的永久变形量为 1%~3%;模锻件、锻环或轧制环的永久变形量为 1%~5%
T×510 T××510 T×××510	适用于固溶热处理或自高温成型过程冷却后,按规定量进行拉伸的挤制棒、型和管材,以及拉制管材,这些产品拉伸后不再进行矫直 挤制棒、型和管材的永久变形量为 1%~3%;拉制管材的永久变形量为 1.5%~3%
T×511 T××511 T×××511	适用于固溶热处理或自高温成型过程冷却后,按规定量进行拉伸的挤制棒、管和管材,以及拉制管材,这些产品拉伸后略微矫直以符合标准公差 挤制棒、型和管材的永久变形量为 1%~3%;拉制管材的永久变形量为 1.5%~3%
T×52 T××52 T×××52	适用于固溶热处理或高温成型过程冷却后,通过压缩来消除应力,以产生 1%~5%的永久变形量的产品

3) 原状态代号与新状态代号的对照 原状态代号与新状态代号的对照如表 1-135 所示。

表 1-135 原状态代号与相应的新状态代号

新代号	原代号	说明
O	M	退火状态
T4	CZ	固溶+自然时效
T6	CS	固溶+人工时效
H×8	Y	加工硬化状态
H×6、H×4	Y1、Y2	3/4 硬、1/2 硬
H×3、H×2	Y3、Y4	1/3 硬、1/4 硬
H×9	T	特(超)硬
H112 或 F	R	热轧、热挤
T×51、T×52	CYS	热处理后冷加工再消除应力

4) 美国变形铝合金加工及热处理状态标记 见表 1-136。

表 1-136 美国变形铝合金加工及热处理状态标记法

代号	说明	代号	说明
F	原加工状态,指变形合金而言,是对力学性能不作严格要求的最初加工状态,如热轧、挤压状态	T	固溶处理后时效,在 T 字后面的第一位数字表示热处理基本类型(1~10),其后面各位数字表示在热处理细节方面有所变化
O	退火再结晶状态		
W	固溶处理,不稳定处理状态	T1	从成型温度冷却并自然时效至大体稳定状态
H	冷作硬化状态	T2	退火状态(只用于铸件)

(续表)

代号	说 明	代号	说 明
T3	固溶处理,冷作后自然时效	T76	固溶处理后进行分级时效
T31	固溶处理冷作(1%)后自然时效	T8	固溶处理冷作后人工时效
T36	固溶处理冷作(6%)后自然时效	T81	固溶处理后冷作,人工时效,可改善固溶处理后的变形及改善强度
T37	固溶处理冷作(7%)后自然时效,用于 2219 合金		
T4	固溶处理后自然时效	T86	固溶处理后冷作(6%),人工时效
T41	固溶处理后沸水淬火	T87	T37+人工时效
T411	固溶处理后空冷至室温,硬度在 O 与 T6 之间,残余应力低	T9	固溶处理后人工时效再冷作
		T10	从成型温度冷却,人工时效后冷作
T42	固溶处理后自然时效,由用户进行处理,适用于 2024 合金,强度比 T4 稍低	T×51	为消除固溶处理后的残余应力进行拉伸处理,板材有 0.5%~3% 的永久变形,棒、型材有 1%~3% 的永久变形,X 代表 3、4、6 或 8,例如 T351、T451、T651、T851 适用于板、拉制棒、线材,拉伸消除应力后不作任何矫正而时效。T3510、T4510、T8510 适用于挤压型材,拉伸消除应力后为使平直度符合公差进行矫正,并时效
T5	从成型温度冷却后人工时效		
T6	固溶处理后人工时效		
T61	T41+人工时效		
T611	固溶处理,沸水淬火	T×52	为消除固溶处理后的残余应力进行压缩变形。固溶处理后进行 2.5% 的塑性变形然后时效,例如 T352、T652
T62	固溶处理后人工时效		
T7	固溶处理稳定化,可提高尺寸稳定性,减小残余应力,提高抗蚀性	T×53	消除热应力
T72	固溶处理后过时效	T×54	为消除精密锻件固溶处理后的残余应力而进行压缩变形
T73	固溶处理后进行分级时效,强度比 T6 低,抗蚀性显著提高		

## 6. 国内外变形铝合金牌号对照(附录六)

## (四) 铸造铝合金

## 1. 铸造铝合金牌号成分

铸造铝合金牌号成分见表 1-137。

表 1-137 铸造铝合金化学成分

(质量百分数,%)

合金牌号	合金代号	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	其他	Al
ZAlSi7Mg	ZL101	6.5~7.5		0.25~0.45					余量
ZAlSi7MgA	ZL101A	6.5~7.5		0.25~0.45			0.08~0.20		余量
ZAlSi12	ZL102	10.0~13.0							余量
ZAlSi9Mg	ZL104	8.0~10.5		0.17~0.3		0.2~0.5			余量
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.6					余量
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	4.5~5.5	1.0~1.5	0.4~0.55					余量
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	7.5~8.5	1.0~1.5	0.3~0.5		0.3~0.5	0.10~0.25		余量
ZAlSi7Cu4	ZL107	6.5~7.5	3.5~4.5						余量
ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	11.0~13.0	1.0~2.0	0.4~1.0		0.3~0.9			余量

(续表)

合金牌号	合金代号	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Ti	其他	Al
ZAlSi2Cu1Mg1Ni1	ZL109	11.0~13.0	0.5~1.5	0.8~1.3				Ni: 0.8~1.5	余量
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	8.0~10.0	1.3~1.8	0.4~0.6		0.10~0.35	0.10~0.35		余量
ZAlSi7Mg1A	ZL114A	6.5~7.5		0.45~0.60			0.10~0.20	Be: 0.04~0.07 <sup>①</sup>	余量
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	4.8~6.2		0.40~0.65				Sb: 0.1~0.25	余量
ZAlSi8MgBe	ZL116	6.5~8.5		0.35~0.55			0.10~0.30	Be: 0.15~0.40	余量
ZAlCu5Mn	ZL201		4.5~5.3			0.6~1.0	0.15~0.35		余量
ZAlCu5MnA	ZL201A		4.8~5.3			0.6~1.0	0.15~0.35		余量
ZAlCu10	ZL202		9.0~11.0						余量
ZAlCu4	ZL203		4.0~5.0						余量
ZAlCu5MnCdA	ZL204A		4.6~5.3			0.6~0.9	0.15~0.35	Cd: 0.15~0.25	余量
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A		4.6~5.3			0.3~0.5	0.15~0.35	Cd: 0.15~0.25 V: 0.05~0.3 Zr: 0.05~0.2 B: 0.005~0.06	余量
ZAlReCu3Si2	ZL207	1.6~2.0	3.0~3.4	0.15~0.25		0.9~1.2		Ni: 0.2~0.3 Zr: 0.15~0.25 Re: 4.4~5.0 <sup>②</sup>	余量
ZAlMg10	ZL301			9.5~11.0					余量
ZAlMg5Si	ZL303	0.8~1.3		4.5~5.5		0.1~0.4			余量
ZAlMg8Zn1	ZL305			7.5~9.0	1.0~1.5		0.1~0.2	Be: 0.03~0.1	余量
ZAlZn11Si7	ZL401	6.0~8.0		0.1~0.3	9.0~13.0				余量
ZAlZn6Mg	ZL402			0.5~0.65	5.0~6.5		0.15~0.25	Cr: 0.4~0.6	余量

注: ① 在保证合金力学性能前提下, 可以不加铍(Be)。

② 混合稀土中含各种稀土总量不小于 98%(质量分数), 其中含铈(Ce)约 45%。

## 2. 铸造铝合金的热处理

(1) 铸造铝合金热处理类型及代号见表 1-138。

表 1-138 铸造铝合金热处理类型及代号

代号	热处理类型	工艺特点	目的和应用
T1	不固溶处理, 人工时效	铸造后快冷(金属型铸造、压铸或精密铸造)后直接进行人工时效	改善切削加工性能, 提高工件表面质量
T2	退火		消除内应力, 提高合金韧性
T4	固溶处理, 自然时效		提高零件强度和耐蚀性
T5	固溶处理, 不完全时效	固溶处理后进行短时间时效或温度较低的时效	得到一定的强度, 保持一定的塑性
T6	固溶处理, 充分时效		得到高强度
T7	固溶处理, 稳定化回火(时效)	时效温度比 T5、T6 高, 接近零件的工作温度	保持较高的组织稳定性和尺寸稳定性
T8	固溶处理, 软化回火	时效温度比 T7 高些	降低零件硬度, 提高塑性

(2) 铸造铝合金的热处理规范和力学性能见表 1-139。

表 1-139 铸造铝合金的热处理规范和力学性能

合金代号	热处理状态	固溶处理			时效			力学性能			零件工作条件及要求
		加热温度(°C)	保温时间(h)	冷却	加热温度(°C)	保温时间(h)	冷却	$R_m$ (MPa)	HB	A(%)	
ZL101	T4(J)	535±5	2~6	60~100℃水				190	50	4	高韧性
	T4(S)							180	50	4	高屈服强度、高硬度
	T5(J)	535±5	2~6	60~100℃水	150±5	2~4	空冷	210	60	2	
	T5(S)							200	60	2	
ZL101	T6(SB)	535±5	2~6	60~100℃水	200±5	3~5	空冷	230	70	1	
	T7(SB)	535±5	2~6	60~100℃水	225±5	3~5		200	60	2	一定强度,较高尺寸稳定性
ZL101	T8(SB)	535±5	2~6	60~100℃水	250±5	3~5		160	55	3	高的尺寸稳定性和塑性
ZL104	T1(J, Y)				175±5	5~7		200	70	1.5	中等负荷
	T6(J)	535±5	2~6	60~100℃水	175±5	10~15		240	70	2	高负荷
	T6(S, B)							230	70	2	
ZL105	T1(S, J)				180±5	5~10		160	65	0.5	中等负荷
	T5(S)	525±5	3~5	100℃水	160±5	3~5		230	70	0.5	中等负荷
	T6(J)	525±5	3~5	60~100℃水	180±5	5~10		260	70	0.5	高负荷
	T7(S, J)	525±5	3~5	60~100℃水	240±5	3~5		200	65	1.0	较高温度下工作
ZL107	T6	515±5	10	60~100℃水	155±5	10					
ZL108	T1				190~210	10~14					
	T6	515±5	3~8	60~100℃水	205±5	6~10	空冷				高温下工作,大负荷
ZL109	T1				230±5	7~9					改善切削加工性能
	T4	535±5	2~6	60~100℃水							高塑性
	T5	535±5	2~6	60~100℃水	155±5	2~7					屈服强度高、硬度高
	T6	535±5	2~6	60~100℃水	225±5	7~9					高强度、高硬度
	T7	535±5	2~6	60~100℃水	250±5	2~4					
ZL201	T4(S)	535±5 545±5	5~9	60~100℃水				300	70	8	分级加热
	T5(S)	535±5 545±5	5~9	60~100℃水	175±5	3~5	空冷	340	80	4	分级加热,高强度、高温工作



(续表)

合金代号	热处理状态	固溶处理			时效			力学性能			零件工作条件及要求
		加热温度(°C)	保温时间(h)	冷却	加热温度(°C)	保温时间(h)	冷却	$R_m$ (MPa)	HB	A(%)	
ZL202	T6(S)	510±5	12	60~100℃水	155±5	10~14					高强度、高硬度
	T6(J)	510±5	12	60~100℃水	175±5	7~14					
	T2				290±5	3					消除残余应力,尺寸稳定
	T7	515±5	3~5	80~100℃水	200~250	3					高温下工作
ZL203	T4	515±5	10~15	60~100℃水				220	65	8	高强度、高塑性
	T5	515±5	10~15	60~100℃水	150±5	2~4		250	80	5	高屈服强度、高硬度
ZL301	T3	435±5	8~20	80~100℃水				350	80	10	

注: J——金属型, S——砂型, B——不变质。

## 3. 铸造铝合金新旧牌号对照

铸造铝合金新旧牌号对照见表 1-140。

表 1-140 铸造铝合金的新旧标准牌号与代号对照

标准	新标准(GB/T1173—1995)			旧标准(GB/T1173—1986)			旧标准(GB/1173—1974)		
代号意义	Z——铸造; Al——基本元素铝的元素符号, 其后数字表示元素的平均百分含量; A——表示优质; ZL——“铸”、“铝”两字汉语拼音第一个字母, 其后第一个数字表示合金系列, 其中 1、2、3、4 分别表示铝硅、铝铜、铝镁、铝锌系列合金, 第二、三个数字表示顺序号								
牌号	序号	合金牌号	合金代号	序号	合金牌号	合金代号	序号	合金牌号	合金代号
	1	ZAlSi7Mg	ZL101	1	ZAlSi7Mg	ZL101		铝-硅合金	
	2	ZAlSi7MgA	ZL101A	2	ZAlSi7MgA	ZL101A	1	101号铸铝	ZL101
	3	ZAlSi12	ZL102	3	ZAlSi12	ZL102	2	102号铸铝	ZL102
	4	ZAlSi9Mg	ZL104	4	ZAlSi9Mg	ZL104	3	103号铸铝	ZL103
	5	ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	5	ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	4	104号铸铝	ZL104
	6	ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	6	ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	5	105号铸铝	ZL105
	7	ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	7	ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	6	106号铸铝	ZL106
	8	ZAlSi7Cu4	ZL107	8	ZAlSi7Cu4	ZL107	7	107号铸铝	ZL107
	9	ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	9	ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	8	108号铸铝	ZL108
	10	ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	10	ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	9	109号铸铝	ZL109
	11	ZAlSi5Cu6Mg	ZL110		—		10	110号铸铝	ZL110
	12	ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	11	ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	11	111号铸铝	ZL111
	13	ZAlSi7Mg1A	ZL114A	12	ZAlSi7Mg1A	ZL114A			
	14	ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	13	ZAlSi5Zn1Mg	ZL115			
	15	ZAlSi8MgBe	ZL116	14	ZAlSi8MgBe	ZL116			
	16	ZAlCu5Mn	ZL201	15	ZAlCu5Mn	ZL201		铝-铜合金	

(续表)

牌 号	序号	合金牌号	合金代号	序号	合金牌号	合金代号	序号	合金牌号	合金代号
	17	ZAlCu5MnA	ZL201A	16	ZAlCu5MnA	ZL201A	12	201号铸铝	ZL201
	—	—	17	ZAlCu10	ZL202	13	202号铸铝	ZL202	
18	ZAlCu4	ZL203	18	ZAlCu4	ZL203	14	203号铸铝	ZL203	
19	ZAlCu5MnCdA	ZL204A	19	ZAlCu5MnCdA	ZL204A				
20	ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	20	ZAlCu5MnCdVA	ZL205A				
21	ZAlRE5Cu3Si2	ZL207	21	ZAlRE5Cu3Si2	ZL207				
22	ZAlMg10	ZL301	22	ZAlMg10	ZL301		铝-镁合金		
23	ZAlMg5Si1	ZL303	23	ZAlMg5Si1	ZL303	15	301号铸铝	ZL301	
24	ZAlMg8Zn1	ZL305	24	ZAlMg8Zn1	ZL305	16	302号铸铝	ZL302	
25	ZAlZn11Si7	ZL401	25	ZAlZn11Si7	ZL401		铝-锌合金		
26	ZAlZn6Mg	ZL402	26	ZAlZn6Mg	ZL402	17	401号铸铝	ZL401	
						18	402号铸铝	ZL401	

## 4. 各国的铸造铝合金牌号对照(附录六)

## (五) 铝合金热处理常见缺陷及预防对策

铝合金热处理常见缺陷及预防对策见表1-141。

表1-141 铝合金热处理常见缺陷及预防对策

缺陷类型	产生原因	预防对策
过 烧	因炉内温差大,加热不均匀,炉温超过了过烧温度,使合金表面发黑并出现结瘤,低熔点共晶体被局部熔化;断后伸长率偏低	选择能均匀加热铝合金零件的加热设备,不宜采用辐射加热炉;严格控制炉温;每一温控区采用双热电偶控温
晶粒粗大	加热温度偏高,保温时间偏长;或处于临界变形量	控制合金冷变形量;严格控加热温度与保温时间
力学性能不合格	1) 退火态:退火温度偏低,保温时间不足;合金晶粒粗大;退火冷却速度过快 2) 固溶态:固溶温度偏低;保温时间不足;淬火转移速度过慢;过时效	严格按合金的热处理工艺要求,设置并控制热处理工艺参数
腐 蚀	常见于盐浴加热的合金表面,主要是硝酸盐浴中的氟化物含量过高引起。含 $\omega_{Cu}>4\%$ 的铝合金,在人工时效状态下,对晶间腐蚀很敏感	硝酸盐浴中氟化物含量 $<0.5\%$ ;移出速度要快;固溶冷却速度要快;热处理后应在热水中清洗
铜扩散至包铝层	带有包铝板的含铜铝合金板材,因固溶或退火时加热温度偏高、保温时间偏长,铜原子向包铝层中扩散,在铝板表面出现灰黄色斑点或长条	严格按合金的热处理工艺要求,设置并控制热处理工艺参数,认真执行
气 泡	1) 表面气泡:易出现在包铝板材上。因包铝板及铸铝表面附有脏物,在加热时,夹层中的空气或水蒸气膨胀,膨胀力超过包铝层的屈服强度,形成表面气泡 2) 穿孔气泡:多出现在薄壁板材、管材和型材上。合金熔炼是由于除气不净,热处理后表露出来	1) 认真清除包铝板及铸铝表面的脏物 2) 加强合金熔炼时的精炼控制
裂 纹	出现在淬火时,因冷却速度快,产生较高的内应力所致	控制淬火水温不至于偏低;对零件结构厚薄差异较大的,采用较低的冷却速度或等温淬火方法

## 二、铜及铜合金

### (一) 纯铜

纯铜又称紫铜,物理性能见表 1-142。工业纯铜具有极好的导电性和延展性,主要加工成线材、管材、带材和棒材。

表 1-142 纯铜的主要物理性质

性 质	数 值
熔点(°C)	1 083.4
沸点(°C)	2 560
密度(g/cm <sup>3</sup> )	8.96
热膨胀系数(20°C)(°C <sup>-1</sup> ) (0~100°C)	16.5×10 <sup>-6</sup> 17.0×10 <sup>-6</sup>
无氧及脱氧铜的结晶收缩率(%)	4.92
平均比热(0~100°C)[J/(kg·K)]	386.0
热导率(0~100°C)[W/(m·K)]	397
电阻率(20°C)(μΩ·cm)	1 694
电阻温度系数(20°C)(μΩ·cm/°C)	0.006 8
泊松比	0.33±0.01

工业纯铜可分为含氧铜、无氧铜和脱氧铜。含氧铜有氢脆倾向,无氧铜和脱氧铜无氢脆倾向。

#### 1. 工业纯铜的牌号(表 1-143)

表 1-143 工业纯铜牌号

材料	一号铜	二号铜	三号铜	四号铜	一号无氧铜	二号无氧铜	一号磷脱氧铜	二号磷脱氧铜	0.1 银铜
牌号	T1	T2	T3	T4	TU1	TU2	TP1	TP2	TAg0.1

#### 2. 工业纯铜的热处理

工业纯铜的热处理主要是通过再结晶退火来消除加工过程中形成的内应力及硬化,退火温度为 500~700°C,含氧铜退火应在弱还原性气氛保护下进行,退火完毕后应迅速水冷,减少氧化。常用纯铜材料的退火温度见表 1-144。

表 1-144 纯铜管材、棒材、带材、线材的退火温度及保温时间

产品类型	牌 号	规格(mm)	退火温度(°C)	保温时间(min)
管 材	T2、T3、T4、TP1 及 TU1、TU2	φ≤1.0	470~520	40~50
		φ1.05~1.75	500~550	50~60
		φ1.8~2.5	530~580	50~60
		φ2.6~4.0	550~600	50~60
		>φ4.0	580~630	60~70
棒 材	T2、TU1、TU2、TP1	软制品	550~620	60~70

(续表)

产品类型	牌 号	规格(mm)	退火温度(°C)	保温时间(min)
带 材	T2	$\delta \leq 0.09$	290~340	
		$\delta = 0.1 \sim 0.25$	340~380	
		$\delta = 0.3 \sim 0.55$	350~410	
		$\delta = 0.6 \sim 1.2$	380~440	
线 材	T2、T3、T4	$\phi 0.3 \sim 0.8$	410~430	

**(二) 铜合金**

铜合金按化学成分可分为黄铜(代号 H)、青铜(代号 Q)、白铜(代号 B)。按工艺可分为变形铜合金及铸造铜合金两大类。

**1. 黄铜**

以锌为主要合金元素( $w_{Zn} 3\% \sim 43\%$ )的铜合金称为黄铜,另外再添加适量的镍、锡、铅等元素则称为镍黄铜、锡黄铜、铅黄铜等。

**1) 变形黄铜的牌号(表 1-145)**

表 1-145 加工黄铜的牌号

组 别	名 称	牌 号	组 别	名 称	牌 号
普通黄铜	96 黄铜	H96	加砷黄铜 ( $w_{As} 0.03\% \sim 0.06\%$ )	77-2 铝黄铜	HAl77-2
	90 黄铜	H90		70-1 锡黄铜	HSn70-1
	85 黄铜	H85		68A 黄铜	H68A
	80 黄铜	H80	锡黄铜	90-1 锡黄铜	HSn90-1
	70 黄铜	H70		62-1 锡黄铜	HSn62-1
	68 黄铜	H68		60-1 锡黄铜	HSn60-1
	65 黄铜	H65	铝黄铜	67-2.5 铝黄铜	HAl67-2.5
	63 黄铜	H63		60-1-1 铝黄铜	HAl60-1-1
	62 黄铜	H62		59-3-2 铝黄铜	HAl59-3-2
	59 黄铜	H59		66-6-3-2 铝黄铜	HAl66-6-3-2
镍黄铜	65-5 镍黄铜	HNi65-5	锰黄铜	58-2 锰黄铜	HMn58-2
	56-3 镍黄铜	HNi56-3		57-3-1 锰黄铜	HMn57-3-1
铅黄铜	63-3 铅黄铜	HPb63-3		55-3-1 锰黄铜	HMn55-3-1
	63-0.1 铅黄铜	HPb63-0.1	铁黄铜	59-1-1 铁黄铜	HFe59-1-1
	62-0.8 铅黄铜	HPb62-0.8		58-1-1 铁黄铜	HFe58-1-1
	61-1 铅黄铜	HPb61-1	硅黄铜	80-3 硅黄铜	HSi80-3
59-1 铅黄铜	HPb59-1				

**2) 黄铜的热处理**

大多数黄铜具有单相  $\alpha$  或双相  $\alpha + \beta$  组织,只能通过冷作加工进行强化。退火处理可以改善黄铜的冷加工性能。半成品退火后的力学性能及冷变形性能主要取决于晶粒尺寸。图 1-23、图 1-24 分别表明晶粒大小和硬度的关系及退火温度与保温时间对硬度的影响。

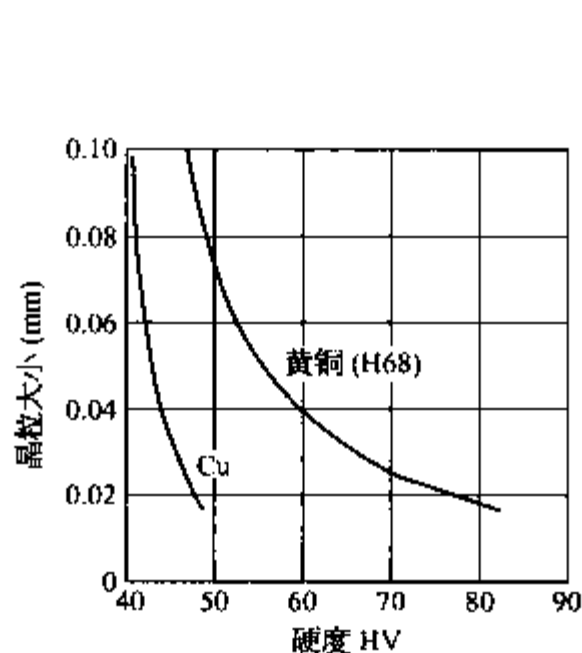


图 1-23 纯铜及黄铜(H68)晶粒大小

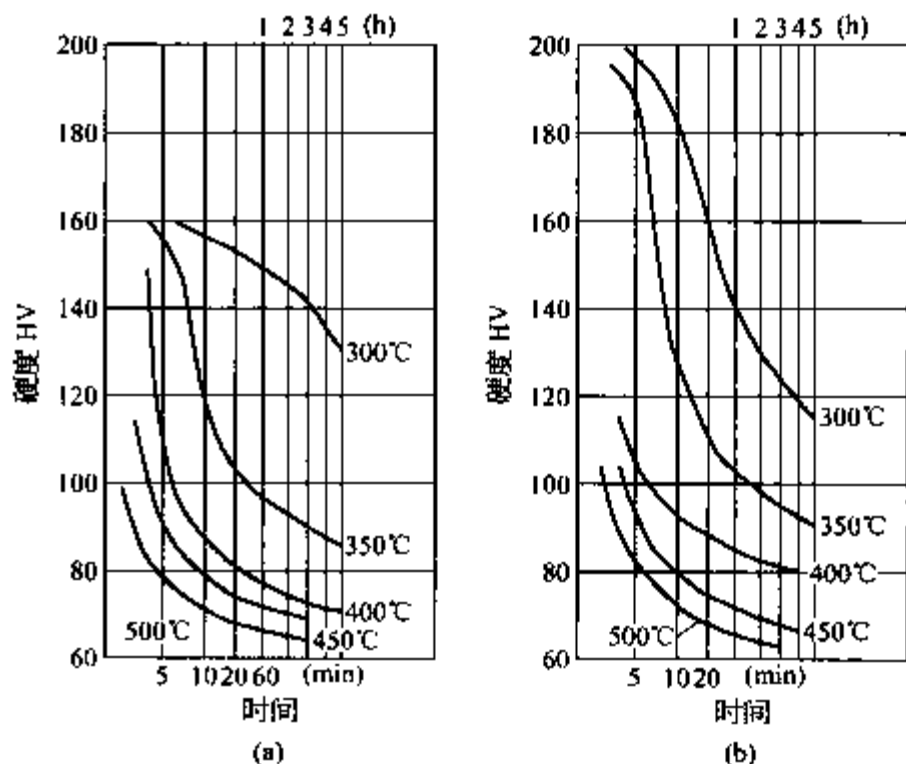


图 1-24 退火温度与时间对黄铜(H68)硬度的影响

黄铜冷加工中间退火及管材、棒材、线材的再结晶退火温度见表 1-146、表 1-147、表 1-148, 力学性能及用途见表 1-149。

表 1-146 黄铜加工中间退火温度 (°C)

牌 号	厚度 > 5 mm	厚度 1~5 mm	厚度 0.1~5 mm	厚度 < 0.5 mm
H96	560~600	540~580	500~540	450~550
H90、HSn70-1	650~720	620~780	560~620	450~560
H80	650~700	580~650	540~600	500~560
H68	580~650	540~600	500~560	440~500
H62、H59	650~700	600~660	520~600	460~530
HFe59-1-1	600~650	520~620	450~550	420~480
HMn58-2	600~660	580~640	550~600	500~550
HSn70-1	600~650	560~620	470~560	450~500
HSn62-1	600~650	550~630	520~580	500~550
HPb63-3	600~650	540~620	520~600	480~540
HPb59-1	600~650	580~630	550~600	480~550

表 1-147 黄铜管材、棒材再结晶退火温度

产品类型	牌 号	退 火 温 度 (°C)		
		硬	拉制成半硬	软
管 材	H96			550~600
	H80			480~550
	H68、H62	340	400~450(半硬)	
	HPb59-1、HSn70-1		420~500(半硬)	
	H60 圆形、矩形波导管	200~250		

(续表)

产品类型	牌 号	退 火 温 度 (°C)		
		硬	拉制成半硬	软
棒 材	H96			550~620
	H90、H80、H70		250~300	650~720
	H68		350~400	500~550
	H62、HSn62-1		400~450	
	H59-1、HFe59-1-1		350~400	
	HMn58-2		320~370	

表 1-148 黄铜线材的再结晶退火温度

牌 号	规格范围(mm)	退 火 温 度 (°C)		
		硬	半 硬	软
H96	0.3~0.6			390~410
H90、H80	0.3~6.0	160~180		390~410
H68	0.3~6.0	160~180	350~370	460~480
H62	0.3~1.0	168~180	160~180	390~410
	1.1~4.8	160~180	240~260	390~410
	5.0~6.0	160~180	260~280	390~410
HPb59-1	0.5~6.0	250~270	330~350	410~430
	0.3~6.0	160~180		390~410

表 1-149 黄铜的力学性能及用途

合金名称	牌 号	状 态	$R_m$ (MPa)	A (%)	用 途
普通黄铜	H96	退 火	240	52	波导管、冷凝管、散热管、散热片、导电零件等
	H90	退 火	260	44	水箱带供水和排水管、电阻帽、奖章、供制双金属等
	H80	退 火	310	52	薄壁管、波纹管、房屋建筑用品等
	H68	退 火	330	56	各种复杂的冷冲件和深冲件、散热器外壳、波导管、波纹管等,用途极广
	H62	退 火	360	49	各种销钉、铆钉、螺母、垫圈、波导管、夹线板、环形件及散热器等零件,制糖工业、船舶工业造纸工业用零件等
锡黄铜	HSn70-1	退火(冷变形 50%)	350(700)	60(4)	海轮冷凝器管
	HSn62-1	退火(冷变形 50%)	400(700)	40(4)	船舶零件
	HSn60-1	退火(冷变形 50%)	380(560)	40(10)	船舶焊接件焊条
铅黄铜	HPb74-3	退火(冷变形 50%)	350(550)	50(4)	汽车拖拉机及一般机器上要求切削性好的零件
	HPb64-2	退火(冷变形 50%)	350(600)	55(5)	钟表和汽车上要求切削性好的零件

(续表)

合金名称	牌 号	状 态	$R_m$ (MPa)	A(%)	用 途
铅黄铜	HPb63-3	退火(冷变形 50%)	350(600)	55(5)	主要用于钟表要求切削性好的零件
	HPb60-1	退火(冷变形 50%)	370(670)	45(4)	热冲击和切削加工件
铝黄铜	HAl85-0.5	退 火	300	60	
	HAl77-2	退火(冷变形 50%)	400(650)	55(12)	海船冷凝器管
	HAl60-1-1	退火(冷变形 50%)	450(750)	45(8)	在海水中工作的高强度零件
	HAl59-3-2	退火(冷变形 50%)	380(650)	50(15)	常温下工作的高强度零件
锰黄铜	HMn58-2	退火(冷变形 50%)	400(700)	40(10)	船舶及弱电工业用零件
	HMn57-3-1	退火(冷变形 50%)	550(700)	25(3)	耐蚀零件
铁黄铜	HFe59-1-1	退火(冷变形 50%)	450(700)	50(70)	在摩擦和海水腐蚀条件下的零件及垫圈、衬套等
	HFe58-1-1	退 火	450	10	适用于热压和切削加工制作的高强零件
镍黄铜	HNi65-5	退 火	380	65	压力计管、冷凝管等
硅黄铜	HSi80-3	退 火	500	40	蒸气管、水管配件可代用耐磨锡青铜
	HSi65-1.5-3	退 火	300	20	

## 3) 铸造黄铜的牌号(表 1-150)

表 1-150 铸造黄铜的牌号及主要成分

(质量分数,%)

牌 号	Cu	Al	Fe	Mn	Si	Zn	Pb	杂质总量 $\leq$
ZCuZn38	60.0~63.0					其余		1.5
ZCuZn25Al6FeMn3	60.0~66.0	4.5~7.0	2.0~4.0	1.5~4.0		其余		2.0
ZCuZn26Al4Fe3Mn3	60.0~66.0	2.5~5.0	1.5~4.0	1.5~4.0		其余		2.0
ZCuZn31Al2	66.0~68.0	2.0~3.0				其余		1.5
ZCuZn35Al2Mn2Fe1	57.0~65.0	0.5~2.5	0.5~2.0	0.1~3.0		其余		2.0
ZCuZn38Mn2Pb2	57.0~60.0			1.5~2.5		其余	1.5~2.5	2.0
ZCuZn40Mn2	57.0~60.0			1.0~2.0		其余		2.0
ZCuZn40Mn3Fe1	53.0~58.0		0.5~1.5	3.0~4.0		其余		1.5
ZCuZn33Pb2	63.0~67.0					其余	1.0~3.0	1.5
ZCuZn40Pb2	58.0~63.0	0.2~0.8				其余	0.5~2.5	1.5
ZCuZn16Si4	79.0~81.0				2.5~4.5	其余		2.0

## 2. 青铜

以锡、铝、铍、硅、锰、铬、锆为主要合金元素的铜合金称为青铜。

## 1) 青铜的牌号(表 1-151)

表 1-151 加工青铜的牌号

组别	名称	牌 号	组别	名称	牌 号
锡青铜	4-3 锡青铜	QSn4-3	铍青铜	2 铍青铜	QBe2
	4-4-2.5 锡青铜	QSn4-4-2.5		1.9 铍青铜	QBe1.9
	4-4-4 锡青铜	QSn4-4-4		1.9-0.1 铍青铜	QBe1.9-0.1
	6.5-0.1 锡青铜	QSn6.5-0.1	硅青铜	1.7 铍青铜	QBe1.7
	6.5-0.4 锡青铜	QSn6.5-0.4		3-1 硅青铜	QSi3-1
	7-0.2 锡青铜	QSn7-0.2		1-3 硅青铜	QSi1-3
	4-0.3 锡青铜	QSn4-0.3		3.5-3-1.5 硅青铜	QSi3.5-3-1.5
铝青铜	5 铝青铜	QA15	锰青铜	1.5 锰青铜	QMn1.5
	7 铝青铜	QA17		2 锰青铜	QMn2
	9-2 铝青铜	QA19-2		5 锰青铜	QMn5
	9-4 铝青铜	QA19-4	锆青铜	0.2 锆青铜	QZr0.2
	10-3-1.5 铝青铜	QA110-3-1.5		0.4 锆青铜	QZr0.4
	10-4-4 铝青铜	QA110-4-4	铬青铜	0.5-0.2-0.1 铬青铜	QCr0.5-0.2-0.1
	11-6-6 铝青铜	QA111-6-6		0.6-0.4-0.05 铬青铜	QCr0.6-0.4-0.05
	9-5-1-1 铝青铜	QA19-5-1-1	镉青铜	1 镉青铜	QCd1
	10-5-5 铝青铜	QA110-5-5	镁青铜	0.8 镁青铜	QMg0.8

## 2) 青铜的热处理

(1) 锡青铜的热处理。含锡  $\omega_{\text{Sn}}$  3%~8% 的锡青铜, 通常不进行固溶处理, 锡青铜的中间退火温度见表 1-152, 成品棒材、线材的退火温度见表 1-153。

表 1-152 锡青铜中间退火温度 (°C)

牌 号	厚度 > 5 mm	厚度 1~5 mm	厚度 0.5~1 mm	厚度 < 0.5 mm
QSn4-3	600~650	580~630	500~600	460~500
QSn4-4-2.5	580~650	550~620	520~680	450~520
QSn7-0.2	620~680	600~650	530~620	500~580
QSn6.5-0.1	600~660	600~650	520~580	470~530
QSn6.5-0.4	600~650	600~650	520~580	470~530

表 1-153 锡青铜棒材及线材成品退火温度 (°C)

牌 号	规 格	硬	软
QSn6.5-0.1	棒材	250~300	
QSn6.5-0.4	0.3~0.6 线材		420~440
QSn7-0.2			

(2) 铝青铜的热处理。铝青铜含  $\omega_{\text{Al}}$  4%~11%, 可以细化晶粒提高强度, 在某些牌号的铝青铜中还加入适量的铁、锰、镍元素。  $\omega_{\text{Al}}$  小于 7% 的铝青铜只能冷作硬化, 大于 9% 的铝青铜可以通过固溶后时效处理来提高硬度, 见表 1-154。



表 1-154 几种两相铝青铜的热处理工艺

牌 号	退火温度(°C)	固溶处理温度(°C)	时效温度(°C)	硬度 HB
QA19-2	650~750	800	350	150~187
QA19-4	700~750	950	250~300(2~3 h)	170~180
QA110-3-1.5	650~750	830~860	300~350	207~285
QA110-4-4	700~750	920	650	200~240
QA111-6-6	—	925(保温 1.5 h)	400(24 h 空冷)	365HV

(3) 铍青铜的热处理。含  $w_{Be}$  1.6%~2.1% 的铍青铜属于沉淀硬化型合金,经固溶时效后,强度可达 1 250~1 500 MPa,硬度可达 350~400HB。固溶温度一般为 780~820°C,对用作弹性元件材料的铍青铜采用 760~780°C 固溶,保温时间按 1 h/25 mm 计算,尺寸很薄的工件可按表 1-155 确定保温时间。

表 1-155 铍青铜薄板、带材及厚度很小的工件固溶处理时的保温时间

材料厚度(mm)	<0.13	0.11~0.25	0.25~0.76	0.74~2.30
保温时间(min)	2~6	3~9	6~10	10~30

不同的热处理制度对铍青铜的力学性能会产生很大影响,见表 1-156~表 1-162 及图 1-25~图 1-27。为消除因切削加工、校直及冷成形产生的残留应力,可进行 150~200°C 保温 60~90 min 的去应力退火。

表 1-156 铍青铜的固溶处理温度及时效温度

合金(质量分数,%)	固溶处理温度(°C)	时效温度(°C)
Cu+Be1.9~2.2+Ni0.2~0.5	780~790	320~330
Cu+Be2.0~2.3+(Ni<0.4)	780~800	300~345
Cu+Be1.6~1.85+Ni0.2~0.4+Ti0.1~0.25	780~800	320~330
Cu+Be1.85~2.1+Ni0.2~0.4+Ti0.1~0.25	780~800	320~330
Cu+Be1.9~2.15+Co0.25~0.35	785~790	305~325
Cu+Be1.6~2.8+Co0.25~0.35	785~790	305~325
Cu+Be0.45~0.6+Co2.35~2.6	920~930	450~480
Cu+Be0.25~0.50+Co1.4~1.7+Ag0.9~1.1	925~930	450~480
Cu+Be0.2~0.3+Ni1.4~1.6	950~960	450~500
Cu+Be0.63+Ti2.48	780~800	400~450
Cu+Be2~2.30+Co0.3~0.45+Fe0.07~0.11	800~820	295~315

表 1-157 固溶处理后铍青铜材料的晶粒尺寸要求

材料厚度(mm)	大于 0.2 至 0.76	大于 0.76 至 2.29	大于 2.29 至 4.78
最大平均晶粒直径(mm)	≤0.035	≤0.045	≤0.060

表 1-158 时效时间对 QBe2 力学性能的影响

处 理 制 度	抗拉强度 $R_m$ (MPa)	断后伸长率 $A$ (%)	硬度 HV0.2
780℃, 25 min, 水淬+320℃, 1 h	1 225	10.0	375
780℃, 25 min, 水淬+320℃, 2 h	1 245	9.0	380
780℃, 25 min, 水淬+320℃, 3 h	1 240	9.0	380
780℃, 25 min, 水淬+320℃, 4 h	1 240	9.0	380
780℃, 25 min, 水淬+320℃, 5 h	1 200	8.0	365
780℃, 25 min, 水淬+320℃, 6 h	1 190	7.0	355

表 1-159 固溶处理温度(保温时间为 25 min)  
对 0.85mm 厚 QBe1.9 板材晶粒尺寸和力学性能的影响(未时效)

固溶处理温度(℃)	740	760	780	800	820	840
晶粒直径(mm)	0.008~0.012	0.012~0.018	0.016~0.025	0.025~0.035	0.035~0.045	0.045~0.055
$R_m$ (MPa)	510	500	490	490	490	485
$A$ (%)	53	54	59	56	50	40

表 1-160 变形度及热处理对 QBe2 及 QBe1.9 条材力学性能的影响

状 态	冷变形度(%)	$R_m$ (MPa)	$A$ (%)	硬度 HV0.2
硬 态	10	570	27.0	—
	20	660~650	23.0~17.0	200
	30	775~705	8.0~10.5	230
	40	835~785	4.5~4.0	245
	50	885~860	3.5	250
	60	925~885	3.0	265
	70	970~925	2.5	275
硬态+固溶处理 (780℃, 25 min, 水淬)	10	470	56.0	—
	20	500~480	59.5~56.0	110
	30	505~475	58.0~56.0	105
	40	500~475	58.5~56.0	105
	50	495~475	58.0~56.0	105
	60	500~480	59.5~55.5	105
	70	500~480	61.5~56.0	105
硬态+固溶处理 (780℃, 25 min, 水淬)+时效 (320℃, 2 h, 空冷)	10	1 295	9.5	430
	20	1 255~1 285	9.0~8.5	380~430
	30	1 255~1 295	9.0	380~430

(续表)

状 态	冷变形度(%)	$R_m$ (MPa)	A(%)	硬度 HV0.2
硬态+固溶处理 (780℃, 25 min, 水淬)+时效 (320℃, 2 h, 空冷)	40	1 250~1 280	9.5	385~430
	50	1 245~1 300	10.5~9.5	385~430
	60	1 250~1 295	9.5~9.0	385~430
	70	1 250~1 315	9.0~8.5	385~435
硬态+时效 (320℃, 2 h, 空冷)	10	1 350	5.5	430
	20	1 275~1 390	7.0~4.5	380~445
	30	1 310~1 425	6.0~3.5	385~450
	40	1 340~1 445	4.0~3.0	395~460
	50	1 320~1 465	4.0~2.5	410~445
	60	1 275~1 460	5.0~2.5	400~460
	70	1 240~1 445	5.0~2.5	380~450

表 1-161 固溶处理制度对 QBe2 及 QBe1.9 时效后力学性能的影响

材 料	固 溶 处 理			320℃、2 h 时效后的力学性能		
	温度(℃)	时间(min)	晶粒度(mm)	$R_m$ (MPa)	A(%)	硬度(HV0.2)
QBe2 (0.33 mm 厚)	760	5	0.015~0.020	1 165	10.5	360
	780	15	0.025~0.030	1 220	9.5	380
	800	10	0.035~0.040	1 250	7.5	400
	820	15	0.040~0.045	1 260	6.0	405
	840	120	0.055~0.065	1 210	4.0	380
QBe1.9 (0.85 mm 厚)	740	25	0.008~0.012	1 220	11.5	355
	760	25	0.012~0.018	1 280	9.5	370
	780	25	0.016~0.025	1 310	9.0	380
	800	25	0.025~0.035	1 310	8.0	395
	820	25	0.035~0.045	1 280	7.0	388
	840	25	0.045~0.055	1 265	6.0	380

表 1-162 时效温度对 QBe2 力学性能的影响

时效温度(℃)	300	310	320	330	340
$R_m$ (MPa)	1 205	1 250	1 255	1 200	1 135
A(%)	11.5	9.0	8.5	8.5	8.0
硬度(HV0.2)	360	380	380	355	330

注: 试样厚度为 0.3 mm, 780℃固溶 25 min 水淬, 时效 2 h。

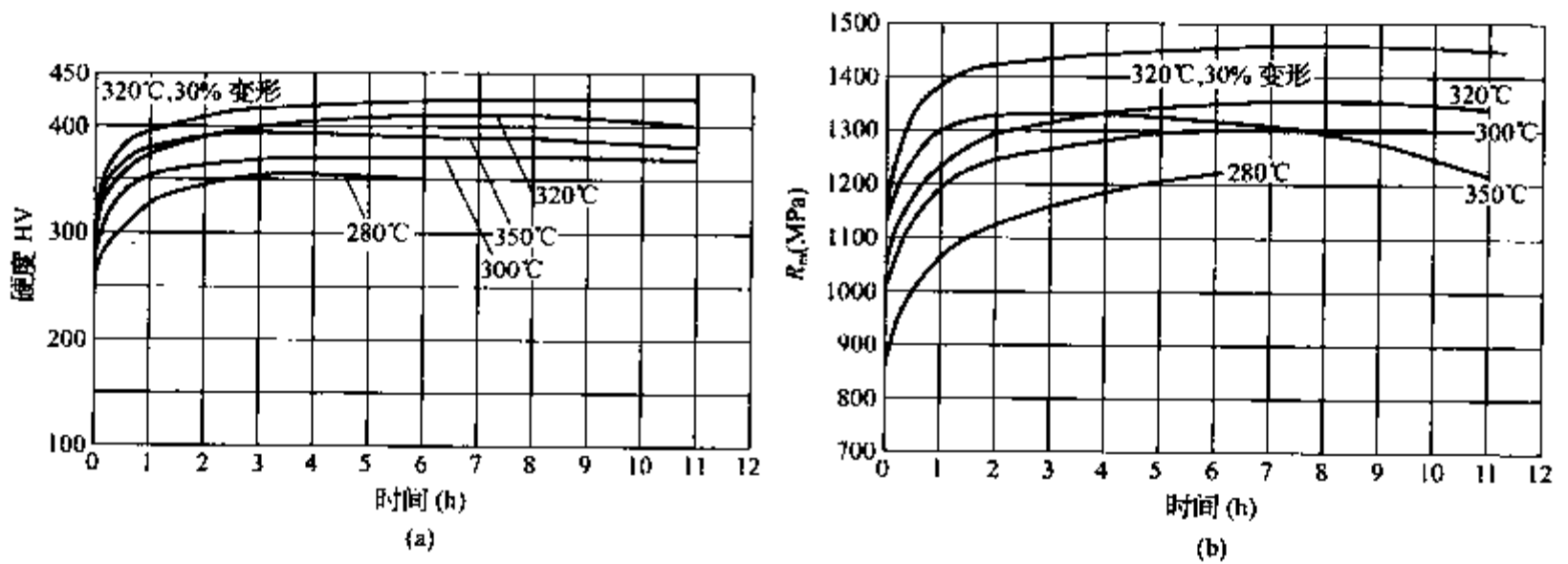


图 1-25 QBe1.9 合金固溶处理(800℃, 15 min, 水淬)后在不同时效温度下的硬化曲线

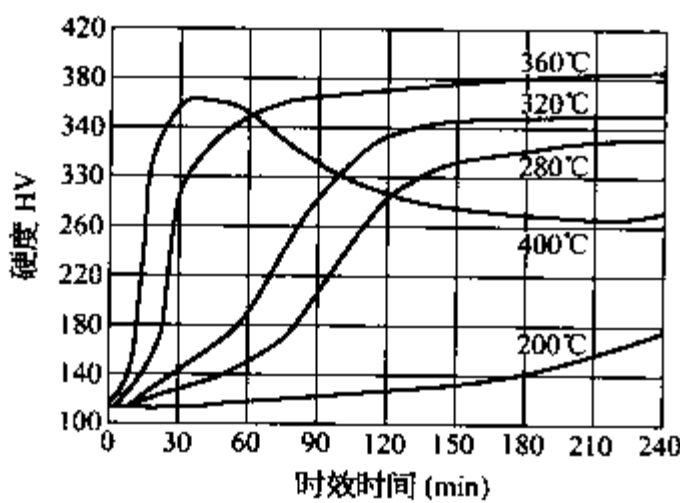


图 1-26 QBe2 时效曲线

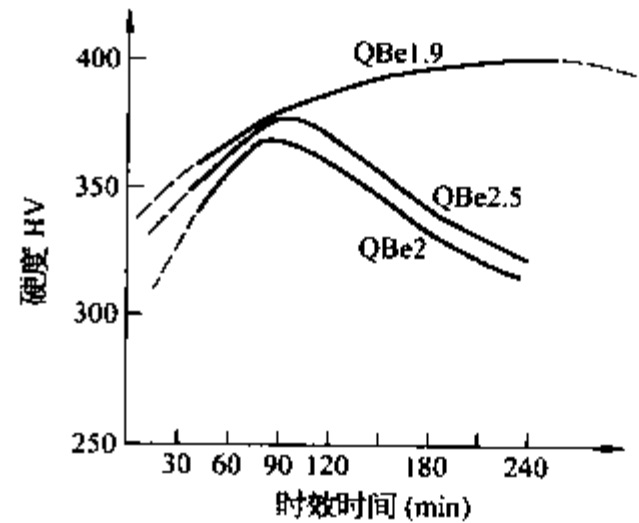


图 1-27 QBe1.9、QBe2.0 及 QBe2.5 在 30℃ 时效的硬化曲线

(4) 其他青铜的热处理。表 1-163 列出了相关牌号青铜的固溶、时效及去应力处理规范。其中,常用的 QSi3-1 硅青铜在用来制造弹性元件时只进行 275~325℃ 去应力退火, QZr0.2 锆青铜一般在固溶后进行冷变形(变形量 50%~75%),再经 420~460℃ 时效来提高强度。

表 1-163 其他青铜的热处理规范

青铜代号	固 溶			时 效		去应力退火		下列厚度(mm)板材的退火温度(℃)				硬 度
	固溶温度(℃)	保温时间	冷却介质	温度(℃)	时间(h)	温度(℃)	时间(h)	>5	1~5	0.5~1	<0.5	
QSi1-3	850~875	1~2 h	水	450~475	1.5~2	280	1	650~700	600~650	500~600	480~520	130~180HB
QSi3-1	790~810	1~2 h	水	410~470	1.5~2	290	1	650~700	600~650	500~600	480~520	130~180HB
QMn1.5	—	—	—	—	—	—	—	650~700	600~650	500~600	480~520	48HRF
QMn5	—	—	—	—	—	—	—	650~700	600~650	500~600	480~520	60HRF
QCd1.0	—	—	—	—	—	280~320	1~3	—	570~590	560~580	540~560	75~100HB

(续表)

青铜代号	固 溶			时 效		去应力退火		下列厚度(mm)板材的退火温度(℃)				硬 度
	固溶温 度(℃)	保温 时间	冷却 介质	温度 (℃)	时间 (h)	温度 (℃)	时间 (h)	>5	1~5	0.5~1	<0.5	
QMg0.3	—	—	—	—	—	280~ 320	1~3	600~ 620	570~ 590	560~ 580	540~ 560	75~ 100HB
QMg0.8	—	—	—	—	—	280~ 320	1~3	600~ 660	570~ 590	560~ 580	540~ 560	80~ 120HB
QTi3.5-0.2	850~ 900	1~3 h	水	400~ 450	2~3	—	—	500~ 600	—	—	—	200~ 230HV
QCr0.5	1000~ 1020	20~ 40 min	水	440~ 470	2~3	—	—	580~ 620	570~ 600	530~ 580	500~ 550	110~ 130HB
QZr0.2	900~ 920	15~ 30 min	水	420~ 460	2~3	—	—	—	—	—	—	120HB
QZr0.4	920~ 950	15~ 35 min	水	420~ 460	2~3	—	—	—	—	—	—	130HB
Cu+0.28 Cr+0.24Zr	950	1~2 h	水	460~ 480	3~4	—	—	—	—	—	—	130HB
Cu+1.5Ni+ 0.3Be+0.1Ti	960~ 980	1~ 1.5 h	水	480~ 500	4	—	—	—	—	—	—	220HB
QTi6-1	850~ 900	1~ 2.5 h	水	420	2	—	—	—	—	—	—	350HV
HD-1	970~ 990	15~ 30 min	水	470~ 490	2	—	—	—	—	—	—	>80HRB

备注：1. 表列硬度值对淬火时效强化的合金为强化后的硬度，其余表示退火后的硬度。  
2. 退火时间一般为1~2 h，退火后空冷。

### 3. 白铜

含镍量不超过50%的铜镍合金称为白铜，添加有锰、锌元素的则称为锰白铜或锌白铜。

#### 1) 铜的牌号(表1-164)

表 1-164 加工白铜化学成分及牌号

组 别	名 称	牌 号	组 别	名 称	牌 号
普通白铜	0.6 白铜	B0.6	锰白铜	3-12 锰白铜	BMn3-12
	5 白铜	B5		40-1.5 锰白铜	BMn40-1.5
	19 白铜	B19		43-0.5 锰白铜	BMn43-0.5
	25 白铜	B25	15-20 锌白铜	BZn15-20	
铁白铜	10-1-1 铁白铜	BFe10-1-1	锌白铜	15-21-1.8 加铅锌白铜	BZn15-21-1.8
	30-1-1 铁白铜	BFe30-1-1		15-24-1.5 加铅锌白铜	BZn15-24-1.5

## 2) 白铜的热处理

白铜铸锭晶内偏析严重,必须进行均匀化退火,见表 1-165。精密仪表用的 BMn3-12 应进行去应力退火,用作弹性元件的 BZn15-20 可采用 325~375℃ 低温退火。中间退火及棒材、线材的成品退火温度见表 1-166 和表 1-167。

表 1-165 白铜均匀化退火制度

牌 号	均 匀 化 退 火	
	温度(℃)	时间(h)
B19、B30	1 000~1 050	3~4
BMn3-12	830~870	2~3
BMn40-1.5	1 050~1 150	3~4
BZn15-20	940~970	2~3

表 1-166 白铜加工产品的中间退火温度 (℃)

牌 号	厚度>5 mm	厚度 1~5 mm	厚度 0.5~1 mm	厚度<0.5 mm
B19、B25	750~780	700~750	620~700	530~620
BZn15-20、BMn3-12	700~750	680~730	600~700	520~600
BAI6-1.5、BAI13-3	700~750	700~730	580~700	550~600
BMn40-1.5	800~850	750~800	600~750	550~600

表 1-167 白铜棒材、线材成品退火温度 (℃)

牌 号	规格(mm)	半 硬	软
BZn15-20	棒 材	400~420	650~700
	线材 $\phi$ 0.3~6.0		600~620
BMn3-12	线材 $\phi$ 0.3~0.6		500~540
BMn4.0~1.5	线材 $\phi$ 0.3~0.8		670~680
	线材 $\phi$ 0.85~2.0		690~700
	线材 $\phi$ 2.1~6.0		710~730

## 4. 国内外铜及铜合金牌号对照(附录六)

## 三、镁及镁合金

镁在地壳中蕴藏丰富,密度为 1.7 g/cm<sup>3</sup>,比强度和比刚度较高,减振能力好,可承受较大的冲击振动负荷。镁及镁合金还具有很好的切削加工和抛光性能,缺点是易氧化,在潮湿大气中抗腐蚀性能差,缺口敏感性较强。当温度高于 225℃ 时其塑性明显提高,故镁及镁合金的塑性变形都在热状态下进行。

镁合金中的合金元素主要有锰、铝、锌、铅及稀土元素等,按生产工艺,镁合金可分为变形镁合金(代号 MB)及铸造镁合金(代号 ZM)两大类。

## 1. 镁合金的牌号及力学性能(表 1-168)

表 1-168 镁合金的主要成分及力学性能

类别	牌号	热处理状态	20℃		150℃		250℃		300℃	
			$R_m$ (MPa)	A(%)	$R_m$ (MPa)	A(%)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)
铸造的合金	ZM1	SZS	240	5.0	—	—	—	—	—	—
	ZM2	S	220	4.0	—	—	—	—	—	—
	ZM3	M	145	3.0	—	—	145	25	110	—
	ZM4	S	150	4.0	—	—	130	30	95	—
	ZM5	Z(ZS)	230(230)	5(2)	—	—	—	—	—	—
	ZM6	ZS	260	5.0	—	—	170	38	110	—
	ZM8	ZS	310	9.5	—	—	—	—	—	—
	ZM9	S	220	8.0	—	—	140	51	115	27
变形的合金	MB1	M	210	4	130	45	60	—	—	—
	MB2	M	240	12	—	—	—	—	—	—
	MB3	M	250	12	—	—	—	—	—	—
	MB5	M	260	8.0	—	—	—	—	—	—
	MB6	M	290	7.0	—	—	—	—	—	—
		Z	300	10.0	—	—	—	—	—	—
	MB7	Z	300	8.0	—	—	—	—	—	—
	MB8	M	250	18	160	—	120	—	—	—
	MB15	Z	280	23.4	—	—	—	—	—	—
ZS		370	9.5	—	—	—	—	—	—	

## 2. 镁合金的热处理

1) 热处理规范 镁合金可进行退火、固溶处理、直接人工时效及固溶+人工时效等。常用的热处理状态符号见表 1-169。

表 1-169 常用镁合金状态符号

热处理类型	状态符号		主要特点
	中国	美国	
退火	M	T2	达到完全再结晶的退火
固溶处理	Z	T4	只进行固溶处理,不进行人工时效
人工时效	S	T1	在铸造或加工变形后,直接进行人工时效,而不进行固溶处理
固溶+人工时效	ZS	T6	工件先进行固溶后,再进行人工时效
固溶热水淬火后人工时效	—	T61	工件在固溶加热后在热水中冷却,再进行人工时效

(1) 退火。镁合金的退火可分为消除内应力退火和完全再结晶退火两种。变形镁合金退火工艺见表 1-170。

表 1-170 变形镁合金退火规范

合金牌号	完全退火		消除内应力退火			
	温度(°C)	时间(h)	板 材		挤压件和锻件	
			温度(°C)	时间(h)	温度(°C)	时间(h)
MB1	340~400	3~5	205	1	260	0.25
MB2	350~400	3~5	150	1	260	0.25
MB3	—	—	250~280	0.5	—	—
MB8	280~320	2~3	—	—	—	—
MB15	380~400	6~8	—	—	260	0.25

注: 1. 当要求较高的  $R_m$  和  $R_{p0.2}$  时可以在 260~290°C 进行退火, 当要求较高的塑性时则需要 320~350°C 进行退火。

2. 表中所列保温时间应以工件发生完全结晶为限, 时间可适当缩短。

(2) 固溶处理及时效。不同牌号的镁合金常用镁合金热处理规范见表 1-171。

表 1-171 常用镁合金热处理规范

合金类别	合金系	合金牌号	热处理类型	固 溶 处 理			时效(或退火)			
				加热温度(°C)	保温时间(h)	冷却介质	加热温度(°C)	保温时间(h)	加热温度(°C)	
高强度铸造镁合金	Mg-Al-Zn	ZM5	1	Z	415±5	14~24	空气	175±5	16	空气
				ZS	415±5	14~24	空气	200±5	8	空气
			2	Z	415±5	6~12	空气	175±5	16	空气
				ZS	415±5	6~12	空气	200±5	8	空气
	Mg-Zn-Zr	ZM1	S	—	—	—	175±5	28~32	空气	
				—	—	—	195±5	16	空气	
			ZM2	S	—	—	—	325±5	5~8	空气
ZM8	ZS	480(H <sub>2</sub> 中)	24	空气	150	24	空气			
耐热铸造镁合金	Mg-RE-Zn-Zr	ZM3	S	—	—	—	250±5	10	空气	
		ZM4	M	—	—	—	325±5	5~8	空气	
			Z	570±5	4~6	压缩空气	—	—	—	
			ZS	570±5	4~6	压缩空气	200	12~16	空气	
		ZM6	ZS(或T61) <sup>①</sup>	530±5	8~12 (4~8)	压缩空气	205	12~16 (8~12)	空气	
	Mg-Y	ZMg	S	—	—	—	310	16	空气	
高强度变形镁合金	Mg-Mn	MB1	M	—	—	—	340~400	3~5	空气	
	Mg-Mn-Ce	MB8	M	—	—	—	280~320	2~3	空气	
	Mg-Al-Zn	MB2	M	—	—	—	280~350	3~5	空气	
		MB3	M	—	—	—	250~280	0.5	空气	
		MB5	M	—	—	—	320~380	4~8	空气	
		MB6	M	—	—	—	320~350	4~6	空气	
			Z	380±5	—	—	—	—	—	
		MB7	M	—	—	—	200±10	1	空气	
	ZS		415±5	—	—	175±5	10	空气		
	Mg-Zn-Zr	MB15	Z	—	—	—	150	2	空气	
ZS			515	2	水	—	—	—		



(续表)

合金类别	合金系	合金牌号	热处理类型	固溶处理			时效(或退火)		
				加热温度(°C)	保温时间(h)	冷却介质	加热温度(°C)	保温时间(h)	加热温度(°C)
耐热变形镁合金	Mg-Nd-Zi <sup>②</sup>	MA11	ZS	490~500	—	水	175	24	空气
		MA12	ZS	530~540	—	水	200	16	空气
锂镁合金	Mg-Li		M	—	—	—	175	6	空气
				—	—	—	150	16	空气

注: ① T61 为美国热处理状态符号, 在热水中冷却加人工时效处理。

② 此二合金牌号为前苏联牌号。

2) 热处理设备和操作 由于镁合金的易氧化和易燃性能, 对镁合金在热处理过程中的每一环节都必须十分注意以防造成严重后果。

热处理用炉:

镁合金的热处理多采用装有高速或中速电风扇的强制空气循环电炉。炉膛工作区的温度控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 内。炉子的气密性要好, 镁合金零件与电炉加热元件之间应装有用不锈钢制作的屏蔽罩或防护隔板, 以免氧化皮掉落在镁合金加热工件上面引起腐蚀。

装炉:

加热工件必须清洁, 应去除镁屑、碎片及油污等。在高温下固溶处理时尤须注意。在同一炉内只允许装同一种合金, 严禁在镁合金炉内装入铝合金材料, 装炉必须十分整齐, 不应妨碍炉内空气循环。

保温时间:

按照加热炉的种类、容积、装炉量、工件尺寸和截面厚度以及工件在炉内的排列方式不同, 其保温时间应有所不同。表 1-171 中所推荐的保温时间适用于电炉加热、装炉量适当及中等截面厚度( $< 25\text{mm}$ )的工件。当炉子容积较小、装炉量大、工件尺寸较大且截面厚度大于 25 mm 时, 必须考虑适当增加保温时间。

保护气氛:

当加热温度超过  $400^{\circ}\text{C}$  时, 必须采用保护气体, 以防止镁合金氧化和燃烧。

常用的保护气体有二氧化碳和二氧化硫, 也可采用惰性气体来保护。体积分数  $\phi(\text{SO}_2)$  为 0.7% 时可使合金加热至  $465^{\circ}\text{C}$  而不燃烧, 体积分数  $\phi(\text{SO}_2)$  为 3% 时可加热到  $510^{\circ}\text{C}$  而不燃烧,  $\phi(\text{SO}_2)$  为 5% 时可加热到  $538^{\circ}\text{C}$  而不燃烧。

二氧化硫在炉中易生成硫酸, 对设备有腐蚀作用, 需经常清洗。二氧化硫对铝合金有腐蚀作用, 不能在镁合金处理炉中处理铝合金, 如果必须在同一炉中处理镁合金和铝合金时, 应用二氧化碳作为保护气体。

淬火介质:

镁合金固溶体的分解速度慢, 常在空气中冷却淬火。当装炉工件密集或工件很厚时, 应采用鼓风冷却或在冷水中冷却。

畸变的控制:

镁合金加热时强度降低, 往往在自重作用下引起畸变。同时, 由于工件中的内应力在加热过程中被消除, 也可引起工件的翘曲畸变。为了防止畸变, 应使用专用的夹具和支架。有些铸件在热处理后仍需矫直。工件在固溶处理后, 人工时效前进行矫直比较容易。

3) 热处理安全技术 镁合金易燃, 潮湿的镁屑则会发生剧烈爆炸, 在热处理时必须十分重视安全技术。在加热前要准确地校正仪表及检查电气设备, 装炉前必须把工件上的毛刺、碎屑、油污及水拭擦清洗干净, 工件上不得带有尖锐棱角。镁合金件绝对禁止在硝酸盐槽中加热, 以免发生爆炸。

当发生控制仪表失灵或错误操作而使炉内工件燃烧时, 应立即切断电源, 关闭电风扇和停止保护气体供应。炉内发生镁燃烧的标志是炉温急剧上升, 从炉内冒出白烟。

当发生燃烧时绝对禁止用水来灭火, 刚刚发生燃烧时火焰较小, 迅速用石棉布或石棉绳严密地封闭加热炉

上所有能进入空气的孔,使空气隔绝,火焰即可扑灭。如果火焰继续燃烧,火焰不大而且燃烧中的工件可以接近并能安全地从炉内移出时,可以把工件移入钢桶中,随即用灭火剂扑灭。如果燃烧中的工件不能接近也不能移出时,可用泵把灭火剂打入炉中,覆盖在燃烧的工件上。

镁及镁合金常用的灭火剂如下:

(1) 二号溶剂:其组成为  $\text{MgCl}_2$  38%~46%,  $\text{KCl}$  32%~40%,  $\text{CaF}_2$  3%~5%,  $\text{BaCl}_2$  5%~8%,  $(\text{NaCl} + \text{CaCl}_2) < 8%$ ,  $\text{MgO} < 1.5%$  (质量分数),制成干粉状。

(2) 溶剂:其组成为  $\text{MgCl}_2$  33%~40%,  $\text{CaF}_2$  15%~20%,  $\text{MgO}$  7%~10%,  $(\text{NaCl} + \text{CaCl}_2) < 6%$  (质量分数),制成干粉状。

(3) 干沙。

(4) 干粉状石墨。

此外,还可采用瓶装的  $\text{BF}_3$  或  $\text{BCl}_3$  气体灭火,其方法是:先切断电源和保护气体,再将  $\text{BF}_3$  通过炉门或炉壁的四氯乙烯导管通入炉内,最小浓度(体积分数)为 0.04%。随着  $\text{BF}_3$  的不断注入,可使火焰熄灭,待炉温下降到  $370^\circ\text{C}$  以下时,再打开炉门;或将  $\text{BCl}_3$  气体通过炉门或炉壁的橡胶管注入炉内,其最低浓度(体积分数)为 0.4%。使用时,最好给气瓶加热,以保证气体的充足供应。 $\text{BCl}_2$  可与燃烧的镁发生反应生成浓雾覆盖工件,达到灭火的目的。气体的注入应直至炉温下降到  $370^\circ\text{C}$  为止。

当炉内的镁合金工件已经燃烧很长时间,且在炉底上已有很多液体金属时,上述两种气体已不能完全扑灭镁合金的燃烧。

$\text{BCl}_3$  和  $\text{BF}_3$  这两种气体相比, $\text{BF}_3$  所需的有效浓度较低,且不需给气瓶加热,它与镁合金件的反应物较  $\text{BCl}_3$  的危害小。而且  $\text{BCl}_3$  的蒸气有腐蚀性,并有恶臭,会危害健康。

灭火人员除备有一般安全装置外,还要戴上有色眼镜保护眼睛,以防激烈白光照射。

4) 国外耐热镁合金及超轻镁锂合金 见表 1-172。国内外镁合金牌号对照见附录六。

表 1-172 国外耐热镁合金及超轻镁锂合金成分(质量分数)及力学性能

牌 号	Nd, Th (%)	Zr (%)	Zn (%)	Mn (%)	Li, La Y, Ce (%)	Ni, Cd Sn, Al (%)	$R_m$	$R_{p0.2}$	A (%)	$R_{p0.2}^{\text{①}}$	$R_{p0.2}^{\text{②}}$	$R_{p0.2}^{\text{③}}$	
										100/100	300/100	350/100	
							MPa			MPa			
耐热 铸造 镁合金	MA19	1.62~ 2.3(Nd)	0.4~ 1.0	0.1~ 0.6	—	1.4~ 2.2(Y)	—	220	120	4	—	35	7
	HK31	3.2 (Th)	0.7	—	—	—	—	190	90	4	—	23	7
	HZ32	2.5~ 4.0(Th)	0.4~ 1.0	1.7~ 2.5	—	—	—	—	190	90	6	—	37
耐热 变形 镁合金	HM21	2(Th)	—	—	0.6	—	—	—	—	—	—	63	—
	HZ11	0.8(Th)	0.6	0.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	MA11	2.5~5.5 (Nd)	—	—	1.5~ 2.5	—	—	—	0.1~ 0.22(Ni)	—	—	—	—
	MA12	2.5~3.5 (Nd)	0.3~ 0.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	MA15	—	0.45~ 0.9	2.5~ 3.5	—	0.7~ 1.1(La)	1.2~ 2.0(Cd)	300~ 320	250~ 260	6~14	—	—	—
	MA19	1.4~ 2.0(Nd)	0.5~ 0.9	5.5~ 7.0	—	—	0.2~ 1.0(Cd)	380~ 400	330~ 360	5~8	—	—	—
	MA20	—	0.05~ 0.12	1.0~ 1.5	—	0.12~ 0.25(Ce)	—	240~ 260	140~ 180	15~ 20	—	—	—

(续表)

牌 号	Nd, Th (%)	Zr (%)	Zn (%)	Mn (%)	Li, La Y, Ce (%)	Ni, Cd Sn, Al (%)	MPa		A (%)	MPa		
							$R_m$	$R_{p0.2}$		$R_{p0.2}^{①}$ 100/100	$R_{p0.2}^{②}$ 200/100	$R_{p0.2}^{③}$ 350/100
超轻 镁锂 合金	NMB1	—	0.6~1.2	0.2~0.8	4.5~6.0(Li)	0.6~1.2(Sn)	290~300	210~220	8	120	—	—
	MA21	—	0.18~2.0	0.1~0.5	7.0~10.0(Li)	3.0~5.0(Cd) 4.0~6.0(Al)	210~280	160~250	8~25	60	—	—
	MA18	—	2.0~2.5	0.1~0.4	0.15~0.35(Ce) 10.0~11.5(Li)	0.5~1.0(Al)	160~220	120~180	15~40	—	—	—

注：① 在 100℃ 下 100 h 内残留变形 ≤ 0.2% 的蠕变强度。  
 ② 在 200℃ 下 100 h 内残留变形 ≤ 0.2% 的蠕变强度。  
 ③ 在 350℃ 下 100 h 内残留变形 ≤ 0.2% 的蠕变强度。

#### 四、钛及钛合金

钛的密度为 4.5g/cm<sup>3</sup>，比强度高。钛合金具有良好的塑性、耐热性及耐蚀性。纯钛是单相组织，不能通过热处理来强化。钛合金按加入元素的不同可分为 α 型、β 型、α+β 型三种，分别以 TA、TB 和 TC 表示，其中 α+β 型和 β 型钛合金可实行热处理强化处理。

##### (一) 钛及钛合金的牌号及化学成分

钛及钛合金的牌号及化学成分见表 1-173、表 1-174、表 1-175、表 1-176。

表 1-173 工业纯钛及化学成分

工业纯钛牌号	杂质元素含量(不大于,质量分数,%)						钛
	铁	硅	碳	氢	氧	氮	
TA1	0.15	0.10	0.05	0.03	0.15	0.10	余量
TA2	0.30	0.15	0.10	0.05	0.15	0.15	
TA3	0.30	0.15	0.10	0.05	0.15	0.15	

表 1-174 α 钛合金的化学成分

牌号	化学元素(质量分数,%)				杂质(不大于,质量分数,%)					
	Al	Sn	Cu	Zr	Fe	Si	C	N	H	O
TA4	2.0~3.5	—	—	—	0.30	0.05	0.10	0.05	0.015	0.15
TA5	3.3~4.7	—	—	0.005B	0.30	0.15	0.10	0.04	0.015	0.15
TA6	4.0~5.5	—	—	—	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15
TA7	4.0~6.0	2.0~3.0	—	—	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.20
TA8	4.5~5.5	2.0~3.0	2.5~3.2	1.0~1.5	0.30	0.15	0.10	0.05	0.015	0.15

表 1-175  $\alpha+\beta$  钛合金的牌号和主要化学成分

牌号	代 号	主要化学成分(质量分数,%)							
		Al	Cr	Mo	Sn	Mn	V	Fe	Si
TC1	Ti-2Al-1.5Mn	1.0~2.5	—	—	—	0.7~2.0	—	—	—
TC2	Ti-3Al-1.5Mn	3.5~5.0	—	—	—	0.8~2.0	—	—	—
TC3	Ti-5Al-4V	4.5~6.0	—	—	—	—	3.5~4.5	—	—
TC4	Ti-6Al-4V	5.5~6.8	—	—	—	—	3.5~4.5	—	—
TC10	Ti-6Al-6V-2Sn-0.5Cu-0.5Fe	5.5~6.5	—	—	1.5~2.5	—	5.5~6.5	0.35~1.0	Co0.35~1.0
TC6	Ti-6Al-1.5Cr-2.5Mo-0.5Fe-0.3Si	5.6~7.0	0.8~2.3	2.0~3.0	—	—	—	0.2~0.7	0.15~6.40
TC7	Ti-6Al-0.6Cr-0.4Fe-0.4Si-0.01B	5.0~6.5	0.4~0.9	—	—	—	—	0.25~0.60	0.25~0.60
TC9	Ti-6.5Al-3.5Mo-2.5Sn-0.3Si	5.8~6.8	—	2.8~3.8	1.8~2.8 或 Zr	—	—	—	0.2~0.4

表 1-176  $\beta$  钛合金的化学成分

牌号	化学成分(质量分数,%)				杂质(质量分数,%)					
	Al	Cr	Mo	V	Fe	Si	C	N	H	O
TB2	2.5~3.5	7.5~8.5	4.7~5.7	4.7~5.7	0.30	0.05	0.05	0.04	0.015	0.15

## (二) 钛及钛合金的热处理

### 1. 退火

1) 去应力退火 用于消除冷加工、冷成型或焊接过程中造成的内应力。退火加热结束后可在空气中冷却。退火的温度及时间对消除应力效果的影响见图 1-128。表 1-177、表 1-178 为钛及钛合金的去应力退火工艺规范。

表 1-177 钛及钛合金的去应力退火规范

牌 号	温度(°C)	时间(h)
工业纯钛 <sup>①</sup>	480~595	0.25~4
TA4	640~660	1~1.5
TA5	640~660	1~1.5
TA6	640~660	1~1.5
TA7 <sup>②</sup>	610~630	1~1.5
TA8	610~630	1~1.5
TC1	520~560	1~1.5
TC2	550~580	1~1.5
TC3	550~650	0.5~4
TC4 <sup>③</sup>	580~620	1~1.5
TC6	630~670	1~1.5
TC7	550~650	0.5~2
TC9	550~650	0.5~4
TC10 <sup>④</sup>	480~650	1~8
TB2	610~630	1~1.5

注：① 可采用的规范：540°C, 0.5~1 h; 480°C, 2~4 h; 427°C, 8 h。

② 可采用的规范：540~650°C, 0.25~4 h。

③ 可采用的规范：480~650°C, 1~50 h, 或用 590°C, 1 h。

④ 可采用的规范：590°C, 2 h。

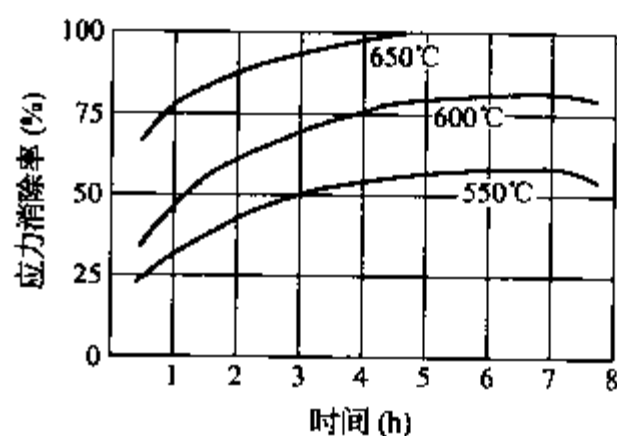


图 1-28 加热温度和时间对消除 Ti-6Al-4V 合金中残留应力的影响

表 1-178 去应力退火保温时间

最大截面(mm)	保温时间(h)
<1.5	10
1.5~2.0	15
2.1~5.5	25
>5.5	60

2) 完全退火、等温退火及双重退火 完全退火目的是使钛合金组织均匀,具有适当的韧性和最大的断后伸长率,对耐热合金可使其在高温下具有尺寸和组织的稳定性。大部分  $\alpha$  和  $\alpha+\beta$  型钛合金在完全退火状态下使用。

等温退火适用于  $\beta$  相稳定化元素含量较高的  $\alpha+\beta$  型钛合金。需先将工件加热到比相变点低  $30\sim 80^\circ\text{C}$  保温,再炉冷到  $300\sim 400^\circ\text{C}$  保温一段时间后空冷。

双重退火可改善  $\alpha+\beta$  型钛合金的塑性,断裂韧性。第一次加热温度高于或接近再结晶终了温度,使再结晶充分进行,晶粒并不明显长大。第二次再加热到稍低温度使  $\beta$  相充分分解、聚集,保证工件在长期工作过程中组织稳定。

表 1-179 为常用钛合金的  $\alpha+\beta\Rightarrow\beta$  相变温度。表 1-180、表 1-181 为钛和钛合金的退火规范。

对于可热处理强化的  $\beta$  型钛合金,其完全退火实际上也就是固溶处理,退火温度一般选择在  $(\alpha+\beta)/\beta$  相变点上,冷却方式采用空冷。

棒材和铸件的退火温度应略高于板材。

退火保温时间的选择与退火工件的尺寸有关。薄件一般不超过 0.5 h,厚件适当延长。

退火保温时间也可按下列经验公式来计算:

$$t = 15 + A \cdot D$$

式中  $t$ ——保温时间(min);

$A$ ——保温时间系数一般为  $1\sim 1.5 \text{ min/mm}$ ;

$D$ ——工件的有效厚度(mm)。

退火后一般在空气中冷却。

3) 真空去氢退火。应用于钛合金中含氢量超过规定值,或不再加工的薄壁精密零件,以防氢脆及损害零件精度。对焊接件因表面易于腐蚀晶粒长大,故退火温度不宜过高,时间不宜过长,一般采用  $540\sim 760^\circ\text{C}$ ,  $2\sim 4 \text{ h}$ 。

表 1-179 常用钛合金的  $\alpha+\beta\Rightarrow\beta$  相变温度

合金牌号	$\beta$ 转变点( $^\circ\text{C}$ )	合金牌号	$\beta$ 转变点( $^\circ\text{C}$ )	合金牌号	$\beta$ 转变点( $^\circ\text{C}$ )
工业纯钛	890~920	TC1	910~930	TC7	1 010~1 030
TA4	960~980	TC2	920~940	TC8	1 000~1 020
TA5	980~1 000	TC3	960~970	TC9	1 000~1 020
TA6	1 000~1 020	TC4	980~990	TC10	930~960
TA7	1 000~1 020	TC5	950~980	TB1	750~780
TA8	950~980	TC6	950~980	TB2	740~760

表 1-180 钛及钛合金的退火规范

合金牌号	退火处理类别	产品类型	加热温度( $^\circ\text{C}$ )	保温时间 <sup>①</sup> (min)	冷却方式
工业纯钛	完全退火	棒材、锻件、型材	670~700	30~120	空冷
		板 材	500~550	30~120	空冷
TA4	完全退火		700~750	30~120	空冷
TA5	完全退火	棒材、锻件、型材	800~850	30~120	空冷
		板 材	750~800	30~120	空冷
TA6	完全退火	棒材、锻件、型材	800~850	30~120	空冷
		板 材	750~800	30~120	空冷
TA7	完全退火	棒材、锻件、型材	800~850		空冷
		板 材	750~800		空冷

(续表)

合金牌号	退火处理类别	产品类型	加热温度(°C)	保温时间 <sup>①</sup> (min)	冷却方式
TA8	完全退火		750~800	60~120	空冷
TC1	完全退火	棒材、锻件、型材	700~730		空冷
		板材	650~670		空冷
	等温退火		840±10 650±10	60~90	炉冷 空冷
TC2	完全退火	棒材、锻件、型材	700~730		空冷
		板材	650~700		空冷
	等温退火		840±10 650±10	60~90	炉冷 空冷
TC3	完全退火		700~800	60~120	空冷
TC4 <sup>②</sup>	完全退火		700~800	60~120	空冷
	等温退火		840±10 550±10	60~90 60~90	炉冷 空冷
	多次退火		730°C以55°C/h 冷到565°C	240	炉冷、空冷
			950°C以55°C/h 冷到565°C		炉冷、空冷
			675°C以55°C/h 冷到565°C	60	炉冷、空冷
	除氢退火		700~815°C炉 冷到590°C	30~120	炉冷、空冷
TC6	完全退火		750~850	60~120	空冷
	等温退火		870±10 650±10	60~90	炉冷 空冷
TC7	完全退火	棒材、锻件、型材、板材	800~850	60~120	空冷
	双重退火		920±10		空冷
			590±10		空冷
TC9 <sup>③</sup>	完全退火		600	60	空冷
TC10	完全退火		700~830	45~120	空冷
TB2	完全退火		800±10	30	空冷

注：① 退火保温时间除注明者外，均按表 1-181 或经验公式计算。

② TC4 的完全退火也可采用下述规范：690~760°C 保温 30~120 min，空冷或炉冷。多次退火可采用下述规范：对于板材，700~730°C 保温后以不大于 30°C/h 的速度冷到 430°C 后空冷；对于棒材和锻件，690~720°C 保温 2 h，空冷；对于挤压件，690~720°C 保温 2 h，以不大于 165°C/h 速度冷到 525~550°C 后空冷。

③ 可采用双重退火规范：930°C，30 min，空冷；530°C，360 min，空冷。

表 1-181 退火保温时间

截面最大厚度(mm)	<1.5	1.5~2.0	2.1~5.5	>5.5
保温时间(min)	10	15	25	60

## 2. 固溶和时效

钛合金的固溶和时效规范见表 1-182, 固溶的保温时间可参照退火保温时间的经验公式计算。

表 1-182 钛合金固溶处理和时效规范

合金牌号	产品类型	固溶处理			时 效		
		加热温度(°C)	保温时间 <sup>①</sup> (h)	冷却介质	加热温度(°C)	保温时间(h)	冷却介质
TC3	—	800~850	—	水	420~500	4~6	空气
TC4 <sup>②</sup>	—	925±10	0.5~2	水	500±10	4	空气
	棒材、锻件、型材	900~950	0.5~1	水	510~590	2~3	空气
TC6	—	840~880	1~1.5	水	550~560	2~4	空气
TC9	—	900~950	1~1.5	水	500~600	2~6	空气
TC10 <sup>③</sup>	板材	880~930	0.25~0.5	水	570~595	4~8	空气
	棒材、锻件、型材	870~930	0.5	水	540~620	4~8	空气
TB2	—	800±10	0.5	水	500±10	8	空气

注: ① 除注明外, 可按经验公式计算。

② 可采用下述规范: 对于薄板, 900~940°C 加热 5~10 min, 水淬; 对于大于 6.4 mm 的厚板, 925~955°C 加热 0.5 h, 水淬; 对于棒材、锻件和挤压件, (955±15)°C 加热 2 h, 水淬。时效均为 540°C 保温 4 h 后空冷。

③ 固溶处理可采用下述规范: 工件厚度 25 mm 时, 845°C 加热 1 h, 水冷; 工件厚度 25~50 mm 时, 870°C 加热 1 h, 水冷; 工件厚度 >50 mm 时, 900°C 加热 1 h, 水冷。

## 3. 形变热处理

钛合金可进行高温形变热处理(形变温度在再结晶温度以上)和低温形变热处理(形变温度在再结晶温度以下)。这两种形变热处理可以分别进行, 也可组合进行。

形变热处理不但能显著提高钛合金的室温强度和塑性, 也可提高合金的疲劳强度和热强性及抗蚀性, 见表 1-183。

表 1-183 几种钛合金最佳形变热处理工艺规范及力学性能对比

合金	热处理工艺	室温性能				450°C 高温瞬时			450°C 持久强度	
		$R_m$ (MPa)	A (%)	Z (%)	$\sigma_{-1}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A (%)	Z (%)	应力 (MPa)	破坏时间 (h)
Ti-6Al-2.5 Mo-2Cr-0.3 Si-0.5Fe (BT3-1)	850°C 淬火 + 550°C 5 h 时效	1150	10	48	560	770	15	46	690	73
	850°C 变形 50%~70%, 水冷, 500°C 5 h 时效	1460	10	45	610	920	13	67	690	163
Ti-6Al-4V (TC4)	880°C 淬火 + 590°C 2 h 时效	1160	15	43	500	743	18.5	63.5	750	110
	920°C 变形 50%~70%, 水冷, 590°C 2 h 时效	1400	12	50	590	985	15	63	750	120

(续表)

合金	热处理工艺	室温性能				450℃高温瞬时			450℃持久强度	
		$R_m$ (MPa)	A (%)	Z (%)	$\sigma_1$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	A (%)	Z (%)	应力 (MPa)	破坏时间 (h)
Ti-4.5Al-3Mo-1V	880℃淬火+480℃ 12 h 时效	1 165	10	37	590	845	15	67	600	24
	850℃变形 50%~70%, 水冷, 480℃ 12 h 时效	1 270	10	39	620	900	17	65	600	86
BT22	820℃变形 30%, 水冷, 630℃ 2 h 时效	1 350	10	35	—	—	—	—	—	—

4. 钛及钛合金的力学性能(表 1-184、表 1-185)

5. 国内外钛合金牌号对照表

国内外钛合金牌号的对照参见附录六。

表 1-184 冶标规定的工业纯钛室温力学性能

牌 号	产品种类	规格 (mm)	室温力学性能(不小于)					
			$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$A_{10}$ (%)	Z(%)	$a_k$ (kJ/m <sup>2</sup> )	弯曲角度(°)
TA1	板 材	0.3~2.0	350~500	40				140
		2.1~10.0	350~500	30				130
	棒 材		350	25		50	800	
	带 材	0.5~0.8	350	40				140

表 1-185 钛合金的力学性能

牌号	材 料	热处理 状态	试验 温度(℃)	$R_m$	$R_{p0.2}$	$A_{10}$ (%)	$a_k$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$R_{m/100}$	$R_{p0.2/100}$
				MPa				MPa	
TA4	锻件 (截面< 70 mm)	退火	20	730	640	22	784	—	—
			200	420	360	28	1 372	—	—
			300	370	320	26	1 764	—	—
TA5	板材 (厚 12 mm)	退火	20	700	650	15( $A_5$ )	588	—	—
			400	400	300	15.7	—	—	—
			500	380	300	13.5	—	—	—
TA6	板材	退火	20	800	690	15	294~490	—	—
			450	430	350	14	—	—	—
			500	350	—	—	—	200	—
TA7	板、棒	退火	20	750~950	650~850	8~15	3 924	—	—
			350	500~600	340~460	—	—	450~500	—
			500	450~520	300~400	—	—	20	—
TA8	板、棒 ( $\phi 12$ )	退火	20	1 040~1 150	985~1 040	10~13.5( $A_5$ )	235.2~313.6	—	—
			450	770	620	18	—	730	400
			500	750	620	17( $A_5$ )	—	500	320



(续表)

牌号	材 料	热处理 状态	试验 温度(°C)	$R_m$	$R_{p0.2}$	$A_{10}$ (%)	$a_k$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$R_{m/100}$	$R_{p0.2/100}$
				MPa				MPa	
TC1	板(厚 ≤10 mm)	退火	20	600~800	—	20~25(A <sub>5</sub> )	—	—	—
TC2	板(厚≤ 10 mm)	退火	20	700	—	12~15(A <sub>5</sub> )	—	—	—
TC3	板(厚≤ 10 mm)	退火	20	900	—	8~10(A <sub>5</sub> )	—	—	—
		退火	20	1 000~1 150	900~1 050	10~15(A <sub>5</sub> )	343~588	—	—
		退火	350	850	—	13	—	—	—
		退火	500	750	—	14	—	—	—
TC4	棒材	退火	20	950	—	10(A <sub>5</sub> )	392	—	—
	棒材、锻件	固溶 时效	20	1 190	—	13(A <sub>5</sub> )	—	—	—
		退火	350	777	630	16.8(A <sub>5</sub> )	—	—	—
		退火	400	630	—	—	—	580	360
TC6	棒材	固溶 时效	20	1 100	1 000	12(A <sub>5</sub> )	—	—	—
		—	400	600	490	14(A <sub>5</sub> )	—	600	306
		—	500	560	420	15(A <sub>5</sub> )	—	360	53
TC7	棒材	—	20	1 000~1 100	950~1 050	10~15(A <sub>5</sub> )	343~588	—	—
		—	400	867	—	14.9(A <sub>5</sub> )	—	700	—
		—	500	771	—	17.2(A <sub>5</sub> )	—	500	150
TC9	棒材	退火	20	1 200	1 030	11(A <sub>5</sub> )	—	—	—
			400	900	720	13(A <sub>5</sub> )	—	—	—
			500	870	720	14(A <sub>5</sub> )	—	≥650	280~310
			550	810	660	15(A <sub>5</sub> )	—	≥450	120~150
TC10	棒材(φ22)	退火	20	1 100~1 150	1 000	10~14(A <sub>5</sub> )	>343	—	—
			400	—	—	—	—	800	—
			450	800	600	19(A <sub>5</sub> )	—	>550	—
TB2	板材 (厚 1.0~ 3.5 mm)、 棒材	固溶 时效	20	1 350	—	8(A <sub>5</sub> )	—	—	—
		固溶	20	≤1 000	—	20(A <sub>5</sub> )	—	—	—
		固溶 时效	20	1 350	—	7(A <sub>5</sub> )	147	—	—
		固溶	20	≤1 000	—	18(A <sub>5</sub> )	294	—	—

## 第八节 铁基粉末冶金材料的牌号、性能与热处理工艺

### 一、铁基粉末冶金材料的牌号和特点

铁基粉末冶金材料是以铁粉、合金钢粉为主要原料,可用来通过粉末冶金的方法制成精密机器零件或有着特殊性能的零件。表 1-186 为铁基粉末件的主要特点和性能。表 1-187 为铁基粉末冶金材料的分类和特征。

表 1-186 铁基粉末件的特点和性能

序号	特点	工艺特性	性能
1	材料和零件的同一性	材料和零件在同一个工艺流程下获得,具有少无切削加工特点	
2	多孔性	通过调整材料成分、粒度和生产工艺,可以控制孔隙尺寸、孔隙度和孔隙分布,孔隙度越小,生产成本越高	均匀的孔隙可使其浸入润滑油。可改善耐磨性,但会降低抗拉强度。均布的球形孔隙有利于提高零件在小能量多冲载荷条件下的抗疲劳性能
3	合金化和显微组织的特殊性	材料中的合金元素通过添加合金粉末方式实现	由于不经熔炼,添加元素的种类和数量不受溶解度限制和密度偏析影响,可制成无密度偏析或过饱和的合金及假合金
4	晶粒度可调	选择不同粒度粉末可获得不同晶粒度。孔隙的存在阻碍晶粒长大。添加对氧亲和力和较大的合金元素较困难。烧结时要求严格控制保护气氛的还原性	可获得很细的晶粒度。添加扩散系数小的元素或扩散温度较低时,材料中会出现合金元素的浓度梯度,显微组织呈多种组织共存的非平衡状态

表 1-187 铁基粉末冶金材料的分类和特性

分类原则	类别	性能及说明
按化学成分	烧结铁	低碳铁粉,化合碳的质量分数不大于 0.2%
	烧结钢	化合碳质量分数为 0.2%~1.0%,其余为铁
	烧结合金钢	除碳外,还添加一种或多种合金元素,如 Cu、Ni、Mo、S、P、C、V、Mn、Si、B 及 RE,余为铁
	烧结不锈钢	以 Cr、Ni 奥氏体不锈钢为主,还有马氏体、铁素体不锈钢。通常用雾化的预合金粉为原料
按材料强度分	低强度烧结钢	抗拉强度小于 400 MPa
	中强度烧结钢	抗拉强度 400~600 MPa
	中高强度烧结钢	抗拉强度 600~800 MPa
	高强度烧结钢	抗拉强度大于 800 MPa
按材料密度分	低密度烧结钢	密度小于 6.2 g/cm <sup>3</sup>
	中密度烧结钢	密度 6.2~6.8 g/cm <sup>3</sup>
	中高密度烧结钢	密度 6.8~7.2 g/cm <sup>3</sup>
	高密度烧结钢	密度大于 7.2 g/cm <sup>3</sup>
	全致密度烧结钢	

## 二、铁基粉末冶金件的制造工艺流程

铁基粉末冶金结构件的制造工艺流程见图 1-29。

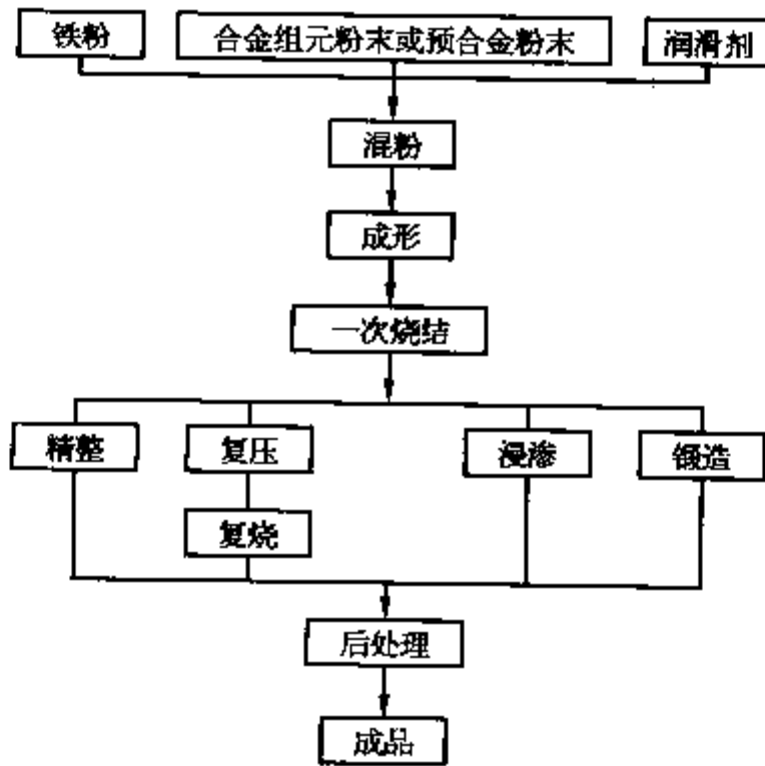
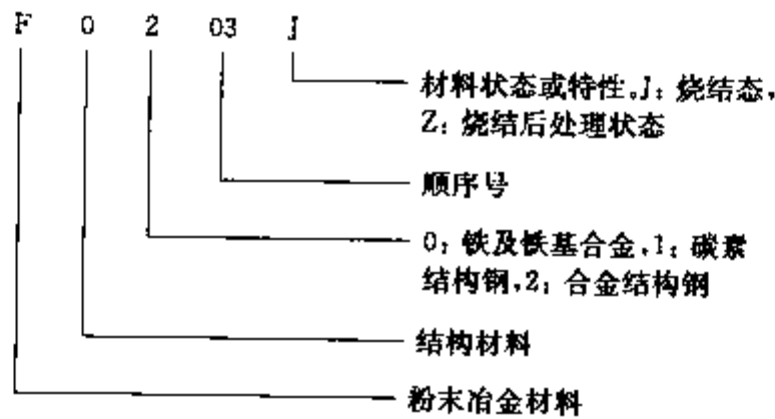


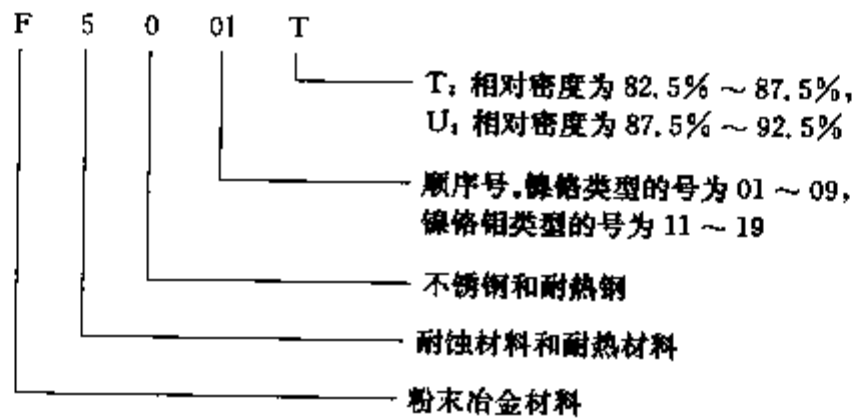
图 1-29 铁基粉末冶金结构件的制造工艺流程

## 三、铁基粉末冶金材料的标记方法

按 GB/T4309—1984, 铁基粉末冶金材料的标记方法为:



粉末冶金烧结不锈钢的标记方法为:





## 第二章

# 真空热处理

真空热处理被称为当代高效、节能和无污染的清洁热处理技术。处理件无氧化、无脱碳,有脱气、脱脂效果,表面质量好、变形少、综合力学性能优异、可靠性好(重复性好、寿命稳定)等一系列优点。因此真空热处理的普及程度已作为衡量一个国家热处理技术水平的重要标志。真空热处理技术已列入当今先进制造技术的重要领域,成为国内外热处理技术发展热点,近三十年来我国真空热处理技术获得迅速发展。

## 第一节 真空获得技术、真空测量和真空检漏

### 一、真空基本知识

#### 1. 真空概念

真空是指在给定空间内低于一个大气压的气体状态,即该空间内气体密度低于该地区大气压的气体分子密度。在标准状态下(即  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $101\,325\text{ Pa}$ ),每立方厘米中的气体分子数为  $2.687 \times 10^{19}$  个,当真空度为  $1.3 \times 10^{-4}\text{ Pa}$  时,气体分子数密度只有  $3.24 \times 10^{10}$  个/ $\text{cm}^3$ 。

#### 2. 真空区域划分(表 2-1)

表 2-1 真空区域划分

真空区域	低真空	中真空	高真空	超高真空
真空度范围(Pa)	$10^5 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10^{-1}$	$10^{-1} \sim 10^{-5}$	$< 10^{-5}$

#### 3. 真空技术名词术语(表 2-2)

表 2-2 真空技术名词术语

术语名称	定义
标准环境条件	温度为 $20^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 65%,大气压为 $101\,325\text{ Pa}$
气体的标准状态	温度为 $0^{\circ}\text{C}$ ,压强为 $101\,325\text{ Pa}$
真空	在指定空间内,低于一个大气压的气体状态
真空度(真空压强)	表示真空状态下气体的稀薄程度,通常用压强值来表示
饱和蒸汽压	在给定温度下,某种物质的蒸汽与其凝聚相处于相平衡状态下的该种物质的蒸汽压力
抽气时间	从某一压强开始抽到要求的压强时所需的时间
工作真空度	在真空容器中为实施工艺所必需的压强
极限真空度	在真空系统和真空泵给定的条件下,容器经充分抽真空后所达到的稳定的最低压强
抽气速率	在一定的压强和温度条件下,单位时间内真空泵从被抽容器中抽除的气体体积
漏气速率	单位时间内气体通过漏孔漏入到真空容器中的气体量 单位:帕·升/秒( $\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ )

(续表)

术语名称	定义
压升率	真空容器在单位时间内因漏气或虚漏(材料放气)而导致压强升高的值 单位: 帕/小时(Pa/h)
真空计	测量低于一个大气压的气体或蒸汽压力的仪器

#### 4. 真空度

在真空技术中常用真空度来表示真空状态下空间气体的稀薄程度。通常真空度用气体的压强来表示。压强越高,真空度越低,压强越低,真空度越高。常用的压强单位及换算见表2-3,帕斯卡为国际单位制中的压强单位,简写为帕(Pa)。

表2-3 常用压强单位换算表

常用单位	帕 Pa	托 Torr	微米汞柱 $\mu\text{mHg}$	微巴 $\mu\text{bar}$	毫巴 mbar	标准大气压 atm	工程大气压 at	英寸汞柱 inHg	普西(磅/英寸 <sup>2</sup> )Psi
1 Pa	1	$7.50062 \times 10^{-3}$	7.50062	10	$10^{-2}$	$9.86923 \times 10^{-6}$	$1.0197 \times 10^{-5}$	$2.953 \times 10^{-4}$	$1.450 \times 10^{-4}$
1 Torr	$1.33322 \times 10^2$	1	$10^3$	$1.33322 \times 10^3$	1.33322	$1.31579 \times 10^{-3}$	$1.3595 \times 10^{-3}$	$3.937 \times 10^{-2}$	$1.934 \times 10^{-2}$
1 $\mu\text{mHg}$	$1.33322 \times 10^{-1}$	$10^{-3}$	1	1.33322	$1.33322 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-6}$	$1.3595 \times 10^{-6}$	$3.937 \times 10^{-5}$	$1.934 \times 10^{-5}$
1 $\mu\text{bar}$	$10^{-1}$	$7.50062 \times 10^{-4}$	$7.50062 \times 10^{-1}$	1	$10^{-3}$	$9.86923 \times 10^{-7}$	$1.0197 \times 10^{-6}$	$2.953 \times 10^{-5}$	$1.450 \times 10^{-5}$
1 mbar	$10^2$	$7.50062 \times 10^{-1}$	$7.50062 \times 10^2$	$10^3$	1	$9.86923 \times 10^{-4}$	$1.0197 \times 10^{-3}$	$2.953 \times 10^{-2}$	$1.450 \times 10^{-2}$
1 atm	$1.01325 \times 10^5$	$7.6 \times 10^2$	$7.6 \times 10^5$	$1.01325 \times 10^6$	$1.01325 \times 10^3$	1	1.0333	$2.9921 \times 10$	$1.4696 \times 10$
1 at	$9.80663 \times 10^4$	$7.3556 \times 10^2$	$7.3556 \times 10^5$	$9.80663 \times 10^5$	$9.80663 \times 10^2$	$9.67839 \times 10^{-1}$	1	$2.8959 \times 10$	$1.4223 \times 10$
1 inHg	$3.386 \times 10^3$	$2.54 \times 10$	$2.54 \times 10^4$	$3.386 \times 10^4$	$3.386 \times 10$	$3.342 \times 10^{-2}$	$3.453 \times 10^{-2}$	1	$4.912 \times 10^{-1}$
1 Psi (lb/in <sup>2</sup> )	$6.895 \times 10^3$	$5.1715 \times 10$	$5.1715 \times 10^4$	$6.895 \times 10^4$	$6.895 \times 10$	$6.805 \times 10^{-2}$	$7.031 \times 10^{-2}$	2.086	1

## 二、真空获得技术

### (一) 真空热处理炉常用的真空泵

真空泵是真空热处理炉的主要组成部分。常用的真空泵有旋片式真空泵、滑阀式真空泵、罗茨真空泵、油增压泵、油扩散泵等类型,见表2-4。

表 2-4 真空热处理炉常用的真空泵的特点及用途

名称及型号	特点及用途
旋片式真空泵 (2X 型)	1) 用于抽除密封容积中干燥的气体或含有少量可凝性蒸气的气体。用于后者场合时需使用该泵的气镇装置 2) 用作油增压泵、罗茨泵、油扩散泵的预抽真空泵 3) 用于真空冶炼、真空焊接、真空处理、真空浇铸、冷冻干燥、电子管、暖水瓶等的真空排气 4) 2X 型真空泵只能在环境温度 5~40℃ 范围内使用 5) 不适用于抽除含氧过高的、有爆炸性、对黑色金属有腐蚀性的以及对真空油起化学反应的气体
滑阀式真空泵 (H 型、2H 型)	该泵采用严密的油封装置,可靠耐用,传动部分采用强制润滑,操作方便、安全可靠。该泵可用来抽除密封容器中的气体及少量水蒸气或含有微小尘埃的气体。使用范围除与 2X 型真空泵相同外,还可用于真空浸渍、真空蒸馏。多数用作高真空泵的前级泵。滑阀泵同样不适用于抽除含氧过高的、有爆炸性的、对黑色金属有腐蚀性的以及对真空油起化学反应的气体
罗茨真空泵 (ZJ 型)	罗茨泵是利用两个 8 字形转子在泵壳中旋转而产生吸气和排气作用的,有较高的压缩比。可作为增压泵使用,但不能单独使用,需要和前级真空泵串联使用。 特点: 1) 转子与泵腔、转子与转子之间有一定间隙,互不接触,不需要用油润滑 2) 在泵内不需要排气阀,可抽除可凝性蒸汽 3) 启动快,能短时间内达到极限真空度,功率小,运转维护费用低 4) 罗茨泵在很宽范围内( $1 \times 10^3 \sim 1$ Pa)有很大抽速,弥补了扩散泵和机械泵在此范围内抽速低的缺陷 缺点: 1) 泵转子制造较困难 2) 抽除氢气效果不如油增压泵 罗茨泵广泛应用于真空脱气、真空熔炼、钢水真空处理和真空热处理等领域
油增压泵 (Z 型)	油增压泵的工作压强范围 $10 \sim 10^{-2}$ Pa,介于机械泵( $1 \times 10^5 \sim 10^{-2}$ Pa)和油扩散泵( $10^{-2} \sim 10^{-6}$ Pa)之间。在 $1 \sim 10^{-1}$ Pa 压强范围内有较大抽速。此泵结构简单,无机械传动部分,便于操作维护。油增压泵不适用于对金属有腐蚀性和对泵油产生化学反应的气体
油扩散泵 (K 型、KT 型、KN 型、KA 型)	油扩散泵是用来获得高真空或超高真空的主要设备。工作压强范围为 $10^{-2} \sim 10^{-6}$ Pa。抽速大、抽速范围宽。结构简单,没有机械运动部分,操作简单,便于维护。广泛应用于电子、冶金、化学工业、原子能工业等尖端科技领域中。带有冷阱装置,可防止泵油返流

真空炉的工作压强选择愈接近极限压强,真空抽气设备的效率就越低。一般工作压强选择在高于极限压强半个到一个数量级。各种真空泵的工作压强范围和真空泵的最佳工作范围见表 2-5。

表 2-5 各种真空泵的工作压力范围和最佳工作范围

泵的种类	2X 旋片式机械泵	滑阀式真空泵	罗茨泵	油增压泵	油扩散泵
工作压强范围(Pa)	$1 \times 10^5 \sim 10^{-2}$	$1 \times 10^5 \sim 10^{-1}$	$4 \times 10^3 \sim 10^{-2}$	$10 \sim 10^{-2}$	$10^{-1} \sim 10^{-6}$
最佳工作范围(Pa)	$1 \times 10^5 \sim 10$	$1 \times 10^5 \sim 10$	$10^2 \sim 1$	$1 \sim 10^{-1}$	$5 \times 10^{-2} \sim 10^{-4}$

## (二) 真空系统

### 1. 真空系统组成

真空热处理炉的真空系统通常由真空炉、真空获得设备(真空泵机组)、控制真空和测量真空的组件设备组成。

(1) 真空泵机组。根据炉子的规格和工作压强分别选配有不同抽气速度的真空泵。

(2) 在炉子和真空泵机组之间配备各种真空元件,如阀门、过滤器、冷阱、波纹管、管路、密封圈和法兰等

组成。

(3) 为测量真空系统的真空度,在系统各个位置上设置测量不同压强的真空规管和真空仪表。

### 2. 真空炉的几种典型真空系统

(1) 真空度在  $1\ 333\sim 1.3\ \text{Pa}$  范围的真空系统。一般只需采用油封式机械泵即可,见图 2-1。当真空度要求稍高,抽气速率要求不太大时,宜选用旋片式真空泵。当需要较大的抽气速率,而真空度要求不太高时,可采用滑阀式真空泵。这种真空系统通常应用在外热式真空炉上进行真空退火、真空渗碳、真空渗氮和真空碳氮共渗等工艺。

(2) 真空度在  $1.3\sim 0.13\ \text{Pa}$  范围的真空系统。图 2-2 为带罗茨泵的真空系统,在真空热处理炉中广泛采用。真空系统通常采用增压泵和机械真空泵组成的机组。增压泵有机械增压泵(罗茨泵)和油增压泵两种。罗茨泵启动快,能在短时间内达到极限真空,功率小,运转维护费用低,有很大的抽气速率,能迅速排出突然放出的气体;同时弥补了油扩散泵在  $1\ 333\sim 1.3\ \text{Pa}$  时抽气速率小的缺陷。但其极限真空度略低于油增压泵组成的真空系统。油增压泵无噪声,而罗茨泵噪声较大。石墨型隔热屏的真空淬火炉多采用此真空系统。

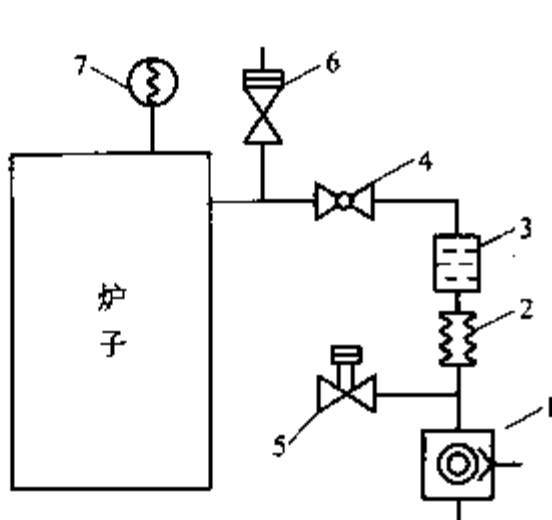


图 2-1 真空度为  $1\ 333\sim 1.3\ \text{Pa}$  的真空系统

- 1—旋转式机械泵; 2—波纹管; 3—过滤器;
- 4—蝶阀; 5—电磁放气阀; 6—电磁挡板阀;
- 7—电阻真空规

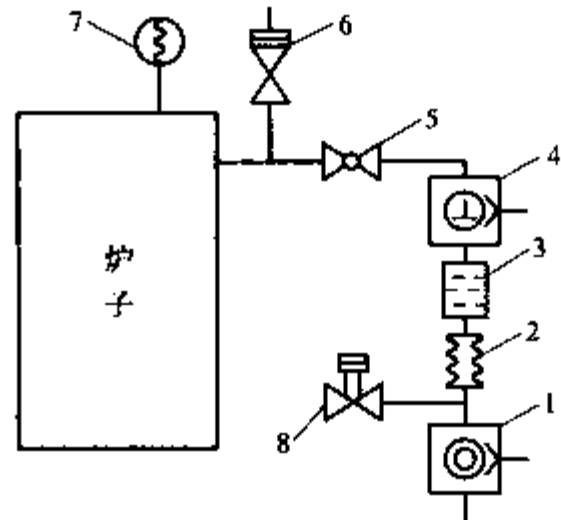


图 2-2 具有罗茨泵的真空系统

- 1—旋转式机械泵; 2—波纹管; 3—过滤器;
- 4—罗茨泵; 5—蝶阀; 6—电磁挡板阀;
- 7—电阻真空规; 8—电磁放气阀

(3) 真空度在  $0.1\sim 10^{-4}\ \text{Pa}$  范围的真空系统。这种三级泵真空系统通常由高真空油扩散泵、高真空阀门、冷阱、障板、增压泵、前级泵等组成(图 2-3),也可以不配用增压泵,而直接由高真空扩散泵和前级泵组成(图 2-4)。通常应用于金属隔热屏的真空钎焊炉、真空回火炉等高真空的炉子。

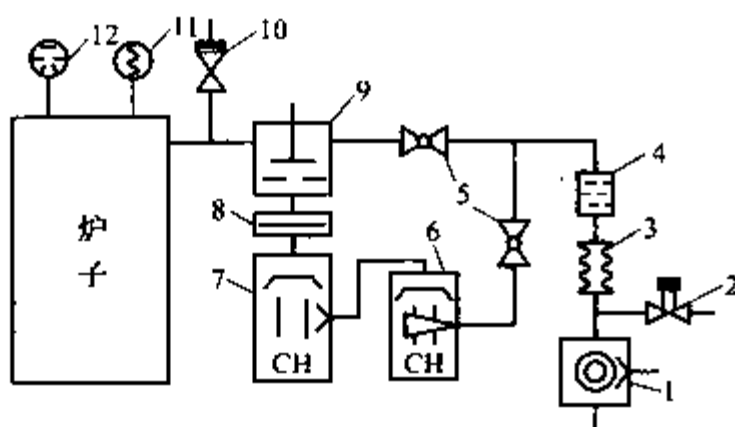


图 2-3 具有增压泵的高真空系统

- 1—旋转式机械泵; 2—电磁放气阀; 3—波纹管;
- 4—过滤器; 5—蝶阀; 6—油增压泵; 7—油扩散泵;
- 8—障板; 9—高真空阀; 10—电磁挡板阀;
- 11—电阻真空规; 12—电离规

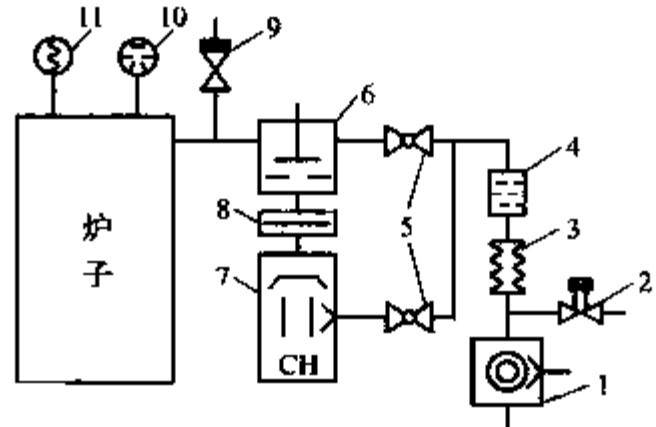


图 2-4 高真空系统

- 1—旋转式机械泵; 2—电磁放气阀; 3—波纹管;
- 4—过滤器; 5—蝶阀; 6—高真空阀; 7—油扩散泵;
- 8—障板; 9—电磁挡板阀; 10—电离规;
- 11—电阻真空规

### (三) 真空系统的主要附件

#### 1. 真空阀门

真空阀门是真空系统中用以调节气流量、切断或接通管路的元件,一般可根据阀门的工作特点、用途分类,见表 2-6。

表 2-6 真空阀门类别

分类方法	阀门名称
工作压强	低真空阀门、高真空阀门、超高真空阀门
用途	截止阀、隔离阀、充气阀、节流阀、换向阀、封闭送料阀
动作方式	手动阀、电动阀、手电两用阀、电磁阀、气动阀、液动式真空阀
材料	玻璃真空活塞(考克)、金属真空阀
结构	挡板阀、翻板阀、蝶阀、连杆阀、隔板阀、闸阀、双通阀、三通阀、四通阀、直通阀、角阀

对真空阀门的基本要求是:流导尽可能大,密封可靠,部件耐磨性好,操作简便,寿命长,容易清洗安装。此外,对于超高真空阀还要求能耐烘烤(450℃),对于节流阀要求能均匀调节气流量。

#### 2. 金属波纹连接管

起管道连接作用,并减少机械泵振动对炉体的影响,补偿安装位置误差和密封连接件的热胀冷缩,金属波纹管的材料一般采用不锈钢。对于小型管路,也可利用真空橡胶管或尼龙管内衬弹簧结构代替。

#### 3. 密封元件

(1) 真空橡胶圈。用作 $\leq 1.3 \times 10^{-4}$  Pa 真空系统的密封元件,工作温度为 $-20 \sim 40^\circ\text{C}$ ,允许泄漏率 $> 1.3 \times 10^{-4}$  Pa·L/s,抽真空后其最大压强 $> 2.45 \sim 2.94$  MPa,通常取为 1.47 MPa。

(2) 硅橡胶、氟橡胶和聚四氟乙烯密封圈。

硅橡胶密封圈:用于 $-100 \sim 350^\circ\text{C}$ , $1.3 \times 10^{-2}$  Pa 真空系统。

氟橡胶密封圈:用于 $-40 \sim 250^\circ\text{C}$ , $1.3 \times 10^{-7}$  Pa 真空系统。

聚四氟乙烯密封圈:用于 $200^\circ\text{C}$ 以下, $1.3 \times 10^{-4}$  Pa 真空系统。

丁腈橡胶密封圈:使用温度为 $-25 \sim 150^\circ\text{C}$ ,普通橡胶使用温度为 $-30 \sim 90^\circ\text{C}$ 。

用于真空密封的橡胶材料,除要求表面光洁、无划伤、无裂纹外,还要有低的出气率,良好的耐热性、耐油性、抗老化性和适宜的压缩变形值(小于 35%),因而一般采用耐油性和其他性能都较好的丁腈橡胶。对有耐热要求的橡胶,一般采用硅橡胶和氟橡胶。

(3) 金属垫圈和金属丝密封垫圈。用于超高真空或密封处工作在较高温度、较高压力下的密封元件,材料有 Al、Cu、Pb、Ag 等。

(4) 动密封结构件。

① O形密封圈:适用真空范围小于 $1.3 \times 10^{-4}$  Pa,往复运动速度小于 0.2 m/s,旋转运动线速度小于 2 m/s。

② J形及 JO形密封圈结构:适用真空范围小于 $1.3 \times 10^{-4}$  Pa,线速度小于 2 m/s,转速小于 3 000 r/min,炉外压强为 $1 \times 10^5$  Pa。

#### 4. 冷阱、过滤器和挡油器

冷阱广泛用于超高真空(或高真空)系统,它装在油扩散泵入口和真空炉之间,不仅能有效捕集来自蒸气流泵的返流蒸气及部分裂解物,而且又可抽除来自真空炉的油蒸气、水蒸气等气体,保护真空泵不受污染。

过滤器的作用是防止真空炉产生的灰尘进入真空泵内污染真空泵油,一般安装在机械泵的入口端管道中。

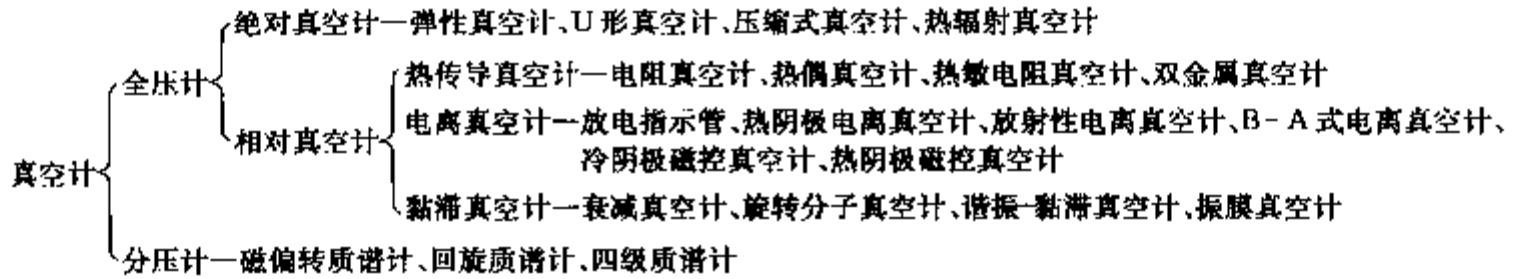
挡油器通常装在油增压泵或油扩散泵的入口,一般用水冷却,其作用是防止油蒸气返回真空炉内,污染真空炉室。



### 三、真空测量

真空测量是在低于一个标准大气压时,对气体或蒸气全压的测量。真空计是测量低于一个标准大气压的气体或蒸气压力的仪器,它由测量仪表、连接导线和传感器组成。

测量 101 325~133. 32 Pa(760~1 Torr)范围的压强可用压差真空计,而低于 133 Pa(1 Torr)的则需利用气体的其他物理特性(压强、黏度、热导率、电离)的真空计来测量。真空计分类如下:



真空热处理炉中常用的真空计有 U 形真空计、弹性真空计、压缩式真空计、电阻真空计(皮拉尼真空计)、热偶真空计、电离真空计等。这些真空计的原理及性能见表 2-7,测量范围见 2-8。

表 2-7 真空计的原理及性能

名称	原理	测量范围 (Pa)	精度	所测压强	与气体种类有无关系	优点	缺点
汞 U 形真空计	利用液柱差直接测量绝对压强值	101 325~133	1%	全压强	无	绝对真空规,小型、坚固、耐用,可做标准(与气体种类无关)	测量范围窄
弹性真空计	利用弹性元件在压差作用下产生的应变进行测量	101 325~133	<10%	全压强	无	可直读、小型、坚固、耐用	精度低,有弹性后效,必要时校准,与气体种类有关
压缩式真空计(麦氏真空计)	利用汞或油压缩气体根据波义耳定律按压缩前后体积变化算出压强差	133~10 <sup>-3</sup>	<3%	不凝结气体分压强	无	精度高,可靠性好,绝对真空规,可做标准	不能连续测量,易损,汞有毒
冷阴极电离真空计	通过冷阴极放电使气体电离,产生的离子流与压强有关	1~10 <sup>-6</sup>	±20%~50%	全压强	有	结构坚固,无发热阴极,可连续测量	测量误差大,结构笨重,规管互换性差,放电稳定性差
热偶真空计电阻真空计	利用气体热传导与压强有关的原理进行测量	133~10 <sup>-1</sup>	10%	全压强	有	结构简单,使用方便可连续测量	精度低,反应慢,受环境温度影响
热阴极电离真空计	利用加热阴极发射电子使气体电离	10 <sup>-1</sup> ~5×10 <sup>-6</sup>	±10%~20%	全压强	有	量程宽,可连续测量,稳定可靠	若使用不当,易烧坏阴极
潘宁真空计	利用电场和磁场中的冷阴极放电现象测量压强	1~10 <sup>-3</sup>	±30%	全压强	有	量程宽,可连续测量,寿命长	精度差,非线性,不稳定

表 2-8 各种真空计测量范围

名称	$P_s$ Torr																	
	10 000	1 000	100	10	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$	$10^{-8}$	$10^{-9}$	$10^{-10}$	$10^{-11}$	$10^{-12}$	
汞 U 形真空计	760																	1
油 U 形真空计		20																$10^{-2}$
布尔登真空计	760																	1
弹性真空计	760																	1
电容式薄膜真空计																		$10^{-4}$
电感式薄膜真空计																		$10^{-2}$
压缩式真空计																		$10^{-5}$
黏滞性真空计																		$10^{-6}$
振膜真空计		100																$10^{-4}$
热辐射真空计																		$10^{-7}$
电阻真空计		100																$10^{-4}$
热偶真空计																		$10^{-3}$
热敏电阻真空计																		$10^{-3}$
电离真空计																		$10^{-8}$
放电管指示器		10																$10^{-3}$
$\alpha$ 射线真空计		100																$10^{-3}$
$\beta$ 射线真空计		50																$10^{-3}$
冷阴极电离真空计																		$10^{-7}$
B-A 真空计																		$10^{-11}$
热阴极电离真空计																		$5 \times 10^{-8}$
冷阴极磁控真空计																		$10^{-13}$
热阴极磁控真空计																		$10^{-14}$
场致显微镜																		$10^{-13}$
磁偏转质谱计																		$10^{-13}$
回旋质谱计																		$10^{-11}$
四极质谱计																		$10^{-12}$

#### 四、真空检漏

真空检漏是指对真空系统或元器件选择恰当的方法,迅速准确地找出漏孔位置,并确定其泄漏率的过程。泄漏率  $Q$  是在单位时间  $t$  内气体通过漏孔漏入到真空容器中的气体量  $V$ :  $Q = p \cdot V/t$ ,  $p$  为系统的压强。

常用的泄漏率单位：托·升/秒(Torr·L/s)、帕·升/秒(Pa·L/s)。表2-9给出了各种泄漏率单位的换算值。

表2-9 泄漏率单位换算表

单 位	托·升/秒 (Torr·L/s)	微米汞柱· 升/秒 ( $\mu\text{mHg}\cdot\text{L/s}$ )	毫升· 大气压/秒 ( $\text{mL}\cdot\text{atm/s}$ )	帕·升/秒 ( $\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ )	帕·米 <sup>3</sup> /秒 ( $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ )	微米汞柱· 英尺 <sup>3</sup> /时 ( $\mu\text{mHg}\cdot\text{ft}^3/\text{h}$ )
托·升/秒 (Torr·L/s)	1	$1\times 10^{-3}$	1.32	$1.33\times 10^2$	$1.33\times 10^{-1}$	$1.27\times 10^5$
微米汞柱·升/秒 ( $\mu\text{mHg}\cdot\text{L/s}$ )	$1\times 10^3$	1	$1.32\times 10^{-3}$	$1.33\times 10^{-1}$	$1.33\times 10^{-4}$	$1.27\times 10^2$
毫升·大气压/秒 ( $\text{mL}\cdot\text{atm/s}$ )	$7.6\times 10^{-1}$	$7.6\times 10^2$	1	$1.01\times 10^2$	$1.01\times 10^{-1}$	$9.65\times 10^4$
帕·升/秒 ( $\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ )	$7.5\times 10^{-3}$	7.5	$9.87\times 10^{-3}$	1	$1\times 10^{-3}$	$9.55\times 10^2$
帕·米 <sup>3</sup> /秒 ( $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ )	7.5	$7.5\times 10^3$	9.87	$1\times 10^3$	1	$9.55\times 10^5$
微米汞柱·英尺 <sup>3</sup> /时 ( $\mu\text{mHg}\cdot\text{ft}^3/\text{h}$ )	$7.87\times 10^{-6}$	$7.87\times 10^{-3}$	$1.04\times 10^{-5}$	$1.05\times 10^{-3}$	$1.05\times 10^{-6}$	1

### 1. 真空热处理炉允许泄漏率

真空容器的漏气是绝对的,不漏气是相对的。真空检漏技术中的“漏”的概念是和最大允许泄漏率的概念联系在一起的。对动态真空系统,只要真空系统的平衡压强能达到所要求的真空度,这时即使存在漏孔,也可认为系统不漏。对静态真空系统,则要求在一定的时间间隔内,系统内的压强维持在所允许的真空度,此时,同样也可认为系统是不漏的。

真空热处理炉允许泄漏率见表2-10。

表2-10 真空热处理炉允许泄漏率

炉子真空度(Pa)	$10\sim 10^{-2}$	$10^{-3}\sim 10^{-4}$	$10^{-5}\sim 10^{-6}$
允许泄漏率( $\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ )	$1.33\times 10^{-4}$	$1.33\times 10^{-5}$	$1.33\times 10^{-6}$

真空系统中漏气、虚漏与抽气之间的平衡关系如下式所示:

$$p = \frac{1}{S}(Q_0 + \epsilon Q_i) + p_0$$

式中  $p$ ——系统达到的压强;

$p_0$ ——真空泵的极限压强;

$S$ ——系统的有效抽速;

$Q_0$ ——由系统外部流向系统内部的总漏率,称为实漏;

$\epsilon Q_i$ ——虚漏所形成的总“漏”率,包括真空系统结构材料表面放气,试验物或工件的放气,系统内加热元件、保温材料的放气、蒸发,气体通过器壁向系统内的渗透以及系统的死角空间中气体的逸出等。

常说的检漏就是对真空系统选择恰当的方法准确地找出实漏( $Q_0$ )的漏孔位置(定位)而确立其泄漏率的过程。

### 2. 真空系统漏气的判断

对于多数真空炉来说,如真空抽不上去,应先对炉子进行烘炉脱气以后,进行总漏气率的测定工作,当总漏气率超过允许值,判定漏气是主要因素以后,再进行检漏。

因泄漏率涉及到真空系统的容积,而系统内容积大小往往很难准确确定,所以真空炉往往用压升率来测定炉子的漏气情况,在必要时再换算成泄漏率。压升率指真空容器在单位时间内因漏气或虚漏(材料放气等)而导致的压强升高值。 $\Delta p = (p_2 - p_1) / \Delta t$ ,  $\Delta p$  为压升率(Pa/h)。  $p_1$  为第一次测量真空容器的压强(Pa);  $p_2$  为第二次测量真空容器的压强(Pa);  $\Delta t$  为两次读数之间的间隔时间(h)。

国内外真空热处理炉出厂标准(新炉),通常压升率规定为 0.67 Pa/h,如炉子使用一段时间以后,允许适当放宽些,但最大应控制在 10 Pa/h(根据热处理工件的表面质量情况确定)。对处理钛合金的炉子,压升率不允许放宽。

真空系统漏气通常用静压法来判断,即容器(真空炉在空炉,经烘烤后)抽真空到一定的压强后,关闭真空阀门,将被抽容器与泵隔开。由于容器的漏气和炉用材料的放气,容器中的压强将随时间的增加而变化,用相应的真空计每隔一定时间测定一次容器中的压强,得出压强—时间曲线(图2-5)。

曲线可能有四种情况:曲线 a 为平行于横坐标的直线,随着时间增加,压强不变。说明容器既不漏气,也不放气。真空度提不高是由于泵工作情况不良引起。曲线 b,压强开始上升较快,而后上升速度渐渐减慢,最后趋于平衡。这说明容器没漏气,真空度上不去为材料放气的影响。曲线 c,容器压强升高与时间成线性增加,说明容器只有漏气,而材料没有放气。曲线 d,开始压强上升较快,而后渐渐减慢,最后变成斜率为  $\Delta p / \Delta t$  的曲线。说明容器既有放气,又有漏气。

刚开始是漏气和放气同时作用的结果,随着时间的增加和压强的升高,放气速率降低,曲线变为直线。

检漏的方法很多,有压力检漏法和真空检漏法,相应的检漏仪器有卤素检漏仪和氦质谱检漏仪等。

1) 压力检漏法 向被检容器内充入一定压强的探索气体,当容器上有漏孔时,探索气体就会从漏孔逸出,用适当的探测器检查探索气体逸出,就可找出漏孔的位置和大小,详见表 2-11。

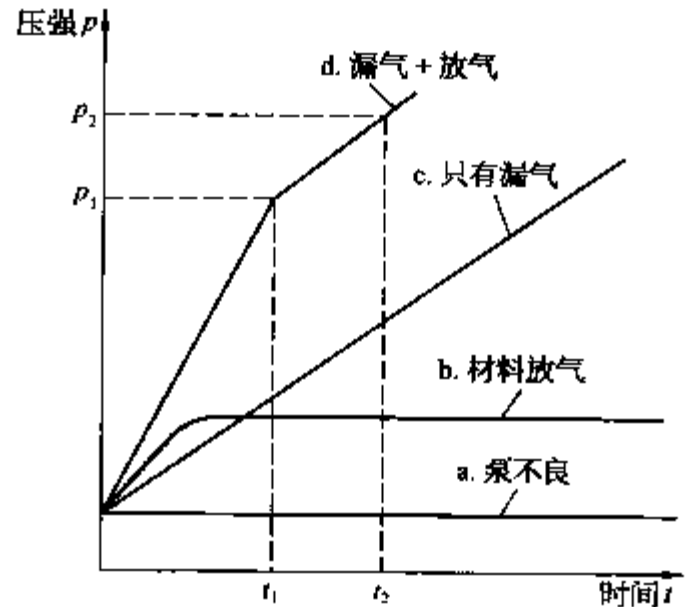


图 2-5 压强—时间曲线

表 2-11 压力检漏法

检漏方法	工作条件	现象	设备	最小可检漏率 (Pa·L/s)	备注
水压法		漏水	人眼	$1.3 \sim 5.3 \times 10^{-4}$	
压降法	充 0.3 MPa 空气	压力下降	压力计	1.3	
听音法	充 0.3 MPa 空气	啞啞声	人耳	5.3	也可用听诊器
超声法	充 0.3 MPa 空气	超声波	超声波检测器	1.3	
气泡法	充 0.3 MPa 空气	水中气泡	人眼	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	
	充 0.3 MPa 空气	水中气泡	人眼	$10^{-6}$	24 h 积累
	充 0.3 MPa 空气	涂抹肥皂液发生肥皂泡	人眼	$6.7 \times 10^{-3}$	
氨检漏法	充 0.3 MPa 氨气	溴代麝香草酚蓝试带变色	人眼	$8 \times 10^{-5}$	观察时间 20 s
	充 0.3 MPa 氨气	溴酚蓝试纸变色	人眼	$10^{-8}$	24 h 积累
卤素检漏仪 吸嘴法		卤素检漏仪读数变化	卤素检漏仪	$10^{-3} \sim 10^{-7}$	可与空气混合 充入
放射性同位素 气体法			闪烁计数器	$1.3 \times 10^{-4}$	
氦质谱检漏仪 吸嘴法			氦质谱检漏仪	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	可与空气混合 充入

2) 真空检漏法 被检查容器抽真空后,把探索气体喷在容器外部可疑部位,如有漏孔,探索气体便通过漏孔进入容器,用适当的探测器将探索气体检出,从而可以判定漏孔的存在、漏孔的大小和它的具体位置,详见表 2-12。

真空热处理炉中常用的检漏法有气泡法、真空规法、卤素检漏仪和氦质谱检漏仪。其中真空规法是利用真空炉本身的真空抽气系统和规管。当炉子真空度达到  $10 \sim 10^{-1}$  Pa 时,在炉子外部用探索气体喷吹或涂覆可疑处,如有漏孔,探索气体或物质蒸气便通过漏孔进入真空系统中。由于探索气体的热导率与系统中剩余气体的热导率差别很大,使炉子的热偶真空计或电阻真空计指示发生变化,可以指出漏孔的位置。常用探索物质有  $H_2$ 、 $CO_2$ 、丙酮、乙醚、酒精等。热偶真空计惯性大、反应慢,所以检漏时,喷吹探索气体不宜太快。

表 2-12 真空检漏法

检漏方法	工作压强 (Pa)	现象	设备	最小可检漏率 (Pa·L/s)	
静态升压法	$<1 \times 10^5$	抽真空后与真空泵隔离,压力上升	真空规	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	
放电管法	$<6.6$	放电颜色改变	放电管	$1 \sim 10^{-1}$	
高频火花检漏法	$10^3 \sim 6.7 \times 10^1$	亮点、放电颜色改变	高频火花检漏器	$1 \sim 10^{-1}$	
真空规检漏法	热传导真空规法	$10^3 \sim 10^{-1}$	真空规读数变化	热偶或电阻真空规	$10^{-3}$
	电离真空规法	$10^{-2} \sim 10^{-6}$		电离真空规	$10^{-6}$
	差动热传导真空规法	$10^3 \sim 10^{-1}$		热传导真空规差动组合	$10^{-4}$
	差动电离真空规法	$10^{-2} \sim 10^{-6}$		电离真空规差动组合	$10^{-7}$
	具有吸附阱的热传导真空规法	$10^3 \sim 6.7 \times 10^{-3}$		热传导规、液氮冷却活性炭阱	$10^{-4}$
	具有吸附阱的电离真空规法			冷阴极电离规、液氮冷却硅胶阱	$10^{-8} \sim 10^{-10}$
氢-钡法	$6.7 \sim 10^{-5}$	氢气通过钡管进入真空规,引起读数变化	钡管、电离规	$10^{-4} \sim 10^{-8}$	
卤素检漏仪内探头法	$10 \sim 10^{-1}$	输出仪表读数变化	卤素检漏仪	$10^{-4} \sim 4 \times 10^{-6}$	
离子泵检漏法	$10^{-4} \sim 10^{-7}$	离子流变化	离子泵	$10^{-6} \sim 10^{-9}$	
氦质谱检漏法	$10^{-2}$	输出仪表读数及声响频率变化	氦质谱检漏仪	$10^{-9} \sim 10^{-11}$	

## 第二节 真空热处理工艺

### 一、真空热处理工艺原理

金属材料的热处理加热通常是在常压条件下进行的,而真空热处理时,工件是在真空(负压)空间中实施加热的。在环境压力发生变化时伴随对材料相变规律的影响以及热处理工艺的变化如下:

#### 1. 金属在真空状态下的相变特点

研究表明:压强每增加 1 000 MPa (9 870 atm),铁碳合金的  $M_s$  点仅下降  $40^\circ\text{C}$ ;在一个大气压范围内的变化,也仅使  $M_s$  点产生  $0.004^\circ\text{C}$  的变化。因而可以推论,在与大气压只差 0.1 MPa 范围内的真空下,完全可以根据常压下固态相变的原理,参考常压下组织转变的数据来制定真空热处理工艺规范。

## 2. 真空在热处理中的作用

在真空中进行热处理,真空对金属材料的作用主要有:

(1) 真空脱气作用。钢铁零件在真空加热过程中,降低炉压,即提高真空度,钢中残留气体( $H_2$ 、 $N_2$ 、 $CO$ 等)就会逸出(脱气),从而可以改善零件的力学性能。如工模具零件经真空淬火后,由于真空脱气作用,塑性、冲击韧度会提高,从而延长使用寿命。

(2) 真空脱脂作用。附在物件上的油脂属于普通脂肪族,是碳、氢和氧的化合物,其蒸汽压较高,在真空中加热时会迅速分解为水蒸气、氢和二氧化碳等气体,它们很容易蒸发而被真空泵抽去(真空清洗机、真空脱脂炉的基本原理同样依据真空的脱脂作用)。但真空热处理前工件仍应经清洗后装入炉内,避免大量的油脂污染炉子和真空泵,以免影响真空泵的性能。

(3) 真空中金属元素的蒸发作用。真空热处理时,如炉内真空度高于金属元素的蒸汽压,工件表面的金属元素就会蒸发,不但会影响工件表面的粗糙度(粗糙,甚至粘连),影响工件的淬透层、耐腐蚀性,还会影响炉子的绝缘性。各种金属在不同温度下的蒸汽压见图 2-6。真空加热中,易蒸发的常见金属元素有 Zn、Mg、Mn、Al、Cr 等。为此,在真空热处理时,为防止工件表面金属元素的蒸发,必须选择适当的真空度或向炉内通入微量惰性气体以降低真空度(分压),防止金属元素的蒸发。

在真空炉中,不能用镀锌铁丝绑扎工件,而应使用不锈钢丝,其原因是为了防止易蒸发的锌元素对炉室的污染。

(4) 真空净化作用。如金属表面有氧化膜、氮化物、氢化物及轻微的锈蚀等,在真空中加热时,这些化合物可被还原、分解或挥发而消失,从而使工件获得光洁的表面。金属氧化物的分解压力见图 2-7。

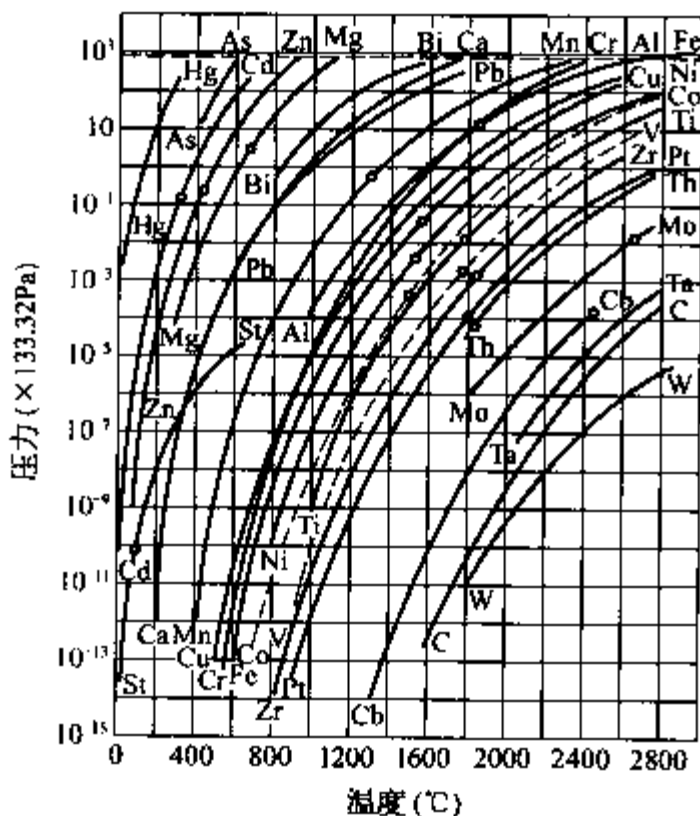


图 2-6 金属蒸汽压与温度关系(图中圆圈表示熔点)

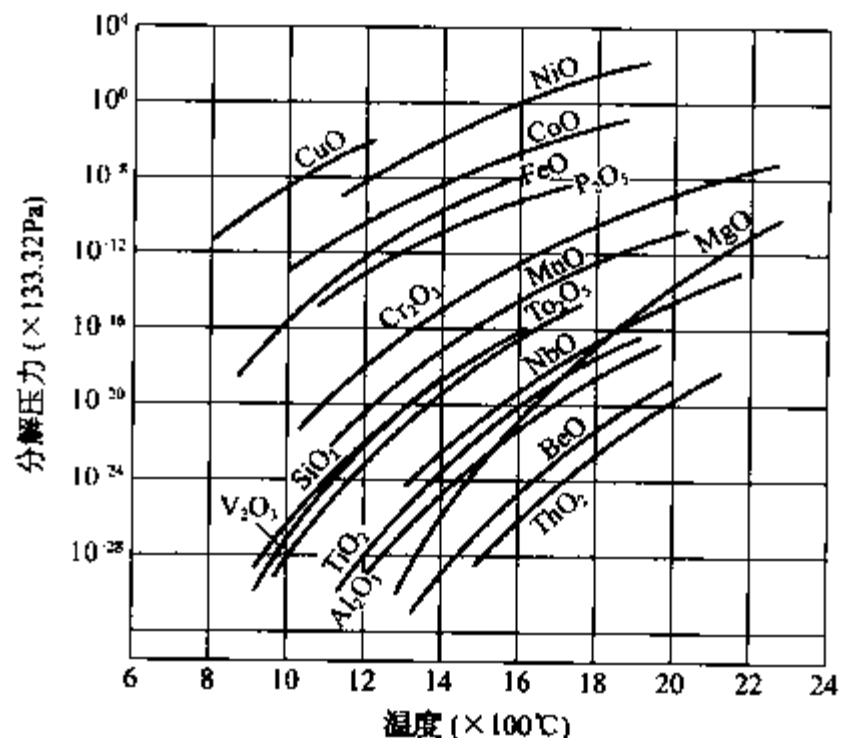


图 2-7 各种氧化物的平衡分解压

真空的净化作用不仅对精密零件的热处理有很重要的意义,而且,能为真空化学热处理创造良好的条件。由于净化作用使金属表面活性增强,使渗碳、渗氮、碳氮共渗的速度增快,而且渗层更加均匀。

(5) 真空保护作用。几乎所有的金属在氧化性气氛中加热时,金属表面会产生氧化而失去金属的光泽。为实现无氧化加热,一般采用保护气体或惰性气体。但对于化学性质活泼的 Ti、Zr 以及难熔金属 W、Mo、Nb、Ta 等,存在微量的氧化性气体就会引起金属氧化;而在真空中,就能确保实现无氧化加热。可见,真空热处理可以使金属材料保持原有的表面光亮度,因此,真空可看作是金属加热最理想的保护气氛。

表 2-13 为真空度与相对杂质含量、相对露点之间关系。在普通保护气氛炉中,欲达到无氧化加热所需控制的露点为  $-30 \sim -40^\circ\text{C}$ ,而此露点的相应真空度为 13.3 Pa,该真空度用一般机械泵就能达到。

表 2-13 真空度和相对杂质及相对露点的关系

真空度	Pa	$1.33 \times 10^4$	$1.33 \times 10^3$	$1.33 \times 10^2$	$1.33 \times 10$	1.33	$1.33 \times 10^{-1}$	$1.33 \times 10^{-2}$	$1.33 \times 10^{-3}$
	Torr	100	10	1	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$
相对杂质含量	%	13.2	1.32	0.132	$1.32 \times 10^{-2}$	$1.32 \times 10^{-3}$	$1.32 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-5}$	$1.32 \times 10^{-6}$
	$10^{-4}\%$			1 320	132	13.2	1.32	0.132	0.013 2
相对露点(°C)			+11	-18	-40	-59	-74	-88	-101

### 3. 金属实现无氧化加热所需的真空度

金属在真空炉中实现无氧化加热的基本条件为气氛中氧的分压必须低于金属氧化物的平衡分解压,但真空炉的总压力一般  $\geq 1.33 \times 10^{-3}$  Pa。为此,不能仅仅依靠抽真空达到无氧化加热的基本要求,还要依靠高温化学反应。炉内通过抽真空将气体排掉以后,剩余的氧化性气体与还原性物质化合,使氧的分压降低到金属氧化物的平衡分解压以下,实现金属的无氧化加热。

研究表明,在  $10^{-1}$  Pa 真空炉(冷态)内残存的气体中,空气仅占 0.5% 左右,其余是水蒸气和其他有机物的蒸气。对采用石墨构件和配有油扩散泵或油增压泵的真空炉,碳的来源十分充足。碳作为脱氧剂,它对降低真空炉中氧的分压起到很重要的作用。

在真空炉中加热时还应注意:

(1) 为达到金属的无氧化加热,加热温度越高所需的真空度越低。真空回火时的真空度要比真空淬火的真空度高,才能得到光亮的金属表面。所以,真空回火炉应采用带扩散泵的高真空机组,而一般真空淬火炉采用带有罗茨泵的两级真空机组就可以了。

(2) 对高铬、高锰合金钢,在  $850^\circ\text{C}$  以上温度加热,工作真空度在 13.3 Pa 即可以实现无氧化加热,真空度不需太高,以减少合金元素的蒸发。

(3) 在高温、高真空条件下加热,如温度高于  $1\ 250^\circ\text{C}$ 、真空度在  $1.3 \times 10^{-2}$  Pa 以上时,某些绝缘材料的还原作用(如  $\text{SiO}_2$  还原成 Si),有破坏绝缘的危险,应当予以注意。

### 4. 真空热处理的加热特点

真空热处理炉的加热,有两个显著的特点:一是空载时炉子的升温速度快,二是工件的加热速度慢。

由于真空炉加热室的保温层采用重量轻、隔热性能好、热容量小的隔热材料,如石墨毡或经抛光的多层钼片、不锈钢板材料,通常,真空炉功率损耗仅为全功率的  $1/4 \sim 1/3$ 。真空炉空载时升温速度相当快,从室温全功率升温到  $1\ 320^\circ\text{C}$ ,一般约需 30 min。

工件在真空炉中加热时加热速率低,升温时间长,尤其是在低温预热阶段( $<700^\circ\text{C}$ ),工件表面与炉膛温差大。工件尺寸越大,温度滞后就越显著。

## 二、真空热处理加热工艺参数的确定

### 1. 真空度

在真空热处理时,工作真空度要根据所处理的工件材料和加热温度来选择,首先要满足无氧化加热所需的工作真空度,再综合考虑表面光亮度、除气和合金元素蒸发等因素。常用金属材料的推荐真空度见表 2-14。

表 2-14 各种材料在真空热处理时推荐的真空度

材 料	真空热处理时的真空度(Pa)
合金工具钢、结构钢、轴承钢(淬火温度在 $900^\circ\text{C}$ 以下)	$1 \sim 10^{-1}$
含 Cr、Mn、Si 等的合金钢(在 $1\ 000^\circ\text{C}$ 以上加热)	10(回充高纯氮)
不锈钢(析出硬化型合金),铁基、镍基、钴基合金	$10^{-1} \sim 10^{-2}$
钛合金	$10^{-2}$
高速钢	$900^\circ\text{C}$ 以上充 $\text{N}_2$ 分压
铜及其合金	133~13.3
高合金钢回火	$1.3 \sim 10^{-2}$

在选用工作真空度时应注意以下几点:

(1) 加热温度 $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ 的高合金工模具钢工件,在加热到 $900^{\circ}\text{C}$ 以前,应先抽高真空,以达到脱气的效果,随后充入高纯氮气在一定分压下继续升温至奥氏体化的温度。

(2) 凡加热温度在 $900^{\circ}\text{C}$ 以下的低合金工具钢,真空度愈高,脱气效果愈好,最好低于 $0.1\text{ Pa}$ 。

(3) 真空度高低对钢的表面光亮度有直接的影响。在不引起合金元素挥发的条件下,真空度愈高,则炉气中残存的氧和水蒸气的含量愈少,工件不易产生氧化,表面的光亮度也愈好。当然,影响光亮度的因素很多,漏气率、冷却介质的特性和钢种都会影响工件的光亮度。

(4) 一般黑色金属在 $10^{-1}\text{ Pa}$ 进行淬火加热,相当于在 $1\times 10^{-4}\%$ 以上纯度的惰性气氛中加热的保护气氛效果,工件表面不会氧化。

(5) 金属在充入氮气和氢气的混合气氛中进行加热时,如充至 $133\text{ Pa}[\phi(\text{N}_2)50\%+\phi(\text{H}_2)50\%]$ ,此时氢气的分压为 $66.5\text{ Pa}$ ,是安全的,其保护效果比 $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{ Pa}$ 的真空还好。这种方法对高铬钢、高速钢、精密合金丝箔以及为防止扩散泵污染的活性材料的高温退火与特殊材料钎焊尤为适用。

(6) 一般在 $10^{-3}\sim 133\text{ Pa}$ 真空范围内,真空炉的温度均匀性可维持在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。随着分压上升,温度均匀性会下降。因此,应合理选择回充分压,既保证金属元素不蒸发又能保持炉温均匀。

### 2. 预热和加热温度

真空加热是以辐射加热为主,在 $700^{\circ}\text{C}$ 以下辐射效率低,升温速度慢,工件的温度滞后于炉膛温度。所以,真空加热需通过多段预热来减少工件温度的滞后,特别是对形状复杂的大尺寸工件,进行多段预热尤其重要。预热工艺规范见表2-15。加热温度参照常规热处理采用的加热温度,通常允许稍低些。

表 2-15 预热温度参考表

淬火加热温度( $^{\circ}\text{C}$ )	预热温度 1( $^{\circ}\text{C}$ )	预热温度 2( $^{\circ}\text{C}$ )	预热温度 3( $^{\circ}\text{C}$ )
$<1000$	500~600		
1000~1100	600~650	800~850	
$>1100$	500~650	800~850	1000~1050

### 3. 真空淬火加热时间

真空加热时的特性曲线见图2-8。在周期作业的真空炉中,影响真空淬火加热时间的因素比较多,如炉膛结构尺寸、装炉量、工件形状和尺寸、加热温度、加热速度以及预热方式等。一般都通过试验方法得到加热时间的经验计算公式。

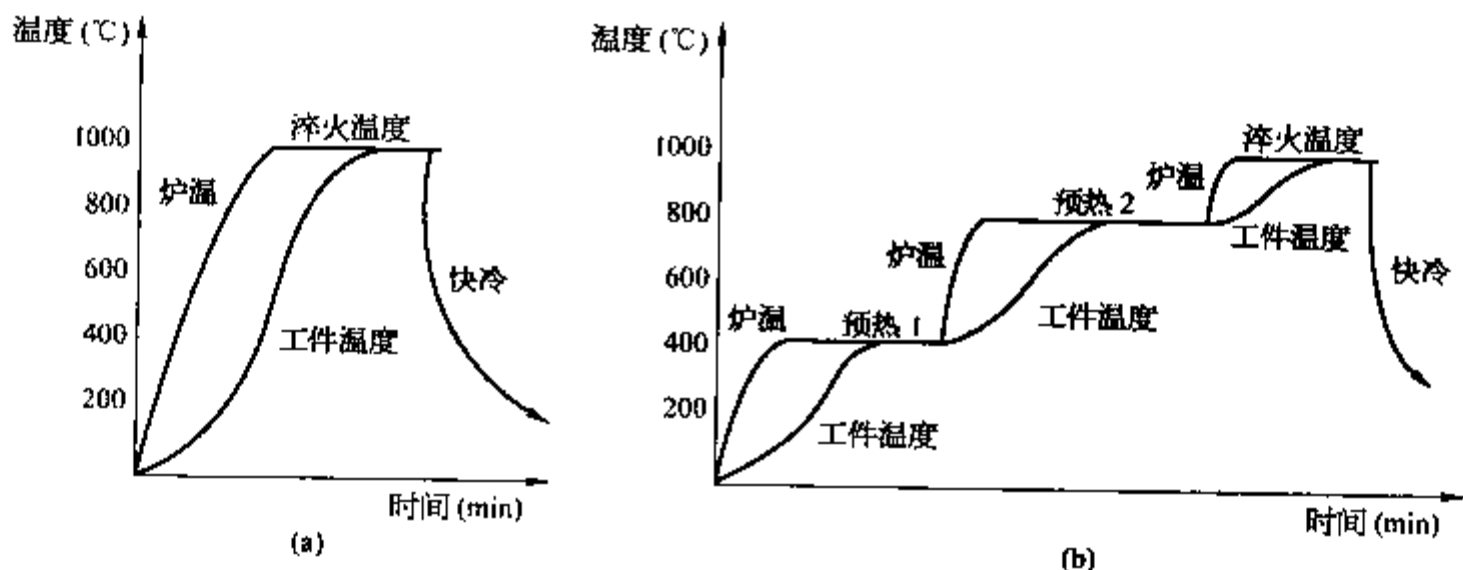


图 2-8 真空加热时的升温特性曲线

(a) 连续升温; (b) 分阶段升温

根据炉温和被加热工件表面与心部的温度曲线(图2-9)可知,在周期作业真空炉中总的加热时间 $t_{\text{总}} =$



$t_{\text{升}} + t_{\text{均}} + t_{\text{保}}$ 。其中,  $t_{\text{升}}$  为工件加热时的升温时间, 应以炉膛指示到温为准。  $t_{\text{均}}$  为透烧工件的均热时间, 可按下面的经验公式求出:

$$t_{\text{均}} = a'D, a' \text{ 为透热系数 (min/mm), 见表 2-16; } D \text{ 为有效厚度 (mm)}。$$

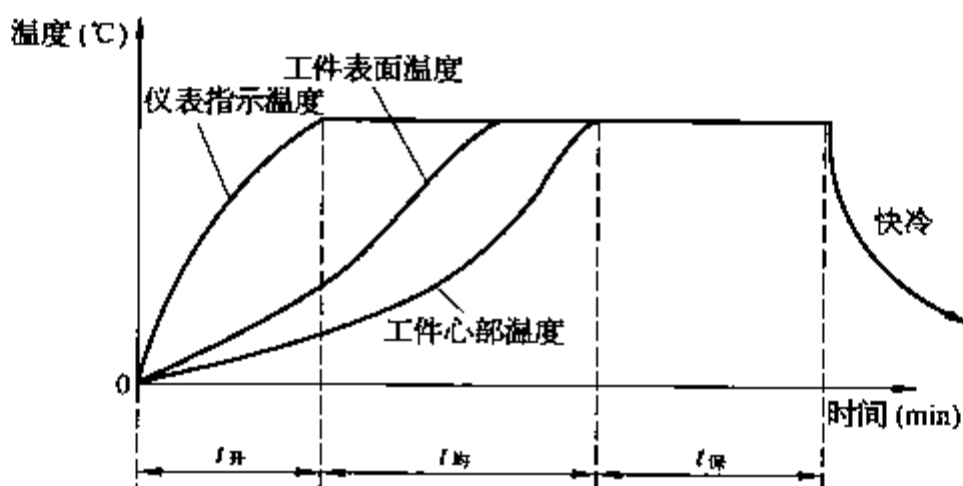


图 2-9 炉温和被加热工件表面与中心温度

表 2-16 透热系数  $a'$  的确定

加热温度(°C)	600	800	1 000	1 100~1 200
$a'$ (min/mm)	1.6~2.2	0.8~1.0	0.3~0.5	0.2~0.4
预热情况		600°C 预热	600°C、800°C 预热	600°C、800°C、1 000°C 预热

注: 没有预热, 直接加热时,  $a'$  应增大 10%~20%。

$t_{\text{保}}$  为奥氏体合金化时间, 以使合金元素在奥氏体中得到充分溶解,  $t_{\text{保}}$  决定于工件钢种(成分)、原始组织及特殊工艺的要求等。普通碳钢的工件到温并均匀以后, 就基本完成珠光体到奥氏体的转变, 在该温度下仅停留一二分钟即可, 甚至无需再加保温时间, 合金钢需一定的保温时间, 见表 2-17。回火加热需要充分保温, 一般在 60 min 左右即可使碳化物充分析出。脱气退火的扩散时间、化学热处理的渗入与扩散时间, 则由技术要求确定。

表 2-17  $t_{\text{保}}$  时间确定 (min)

钢 材	碳素工具钢	低合金钢	高合金钢
$t_{\text{保}}$	5~10	10~20	20~40

所以, 真空淬火的加热时间  $t_{\text{总}} = t_{\text{升}} + t_{\text{均}} + t_{\text{保}} = t_{\text{升}} + a'D + t_{\text{保}}$ 。

对单室真空炉, 可以将工件热电偶的温度与炉子控温热电偶温度进行比较确定  $t_{\text{均}}$  (均热保温时间), 再适当增加  $t_{\text{保}}$  即可淬火。双室真空炉可根据经验方法确定  $t_{\text{均}}$ , 也可对零件在真空炉中加热的滞后时间根据生产实际情况选择典型尺寸试样进行实际测定。

为了提高真空热处理的生产效率, 克服真空炉在低温预热阶段升温速度缓慢的缺点, 目前, 国内外真空热处理炉多数带有对流加热装置, 它能使工艺周期缩短 1/3~1/2。

### 三、真空热处理的冷却方法

真空热处理的冷却介质与冷却方法同样按照淬火工件的材料、材质、形状尺寸、技术要求来确定的。

#### (一) 真空油淬

##### 1. 真空淬火油的条件

(1) 蒸汽压低, 不易挥发。要求蒸汽压低于  $10^{-2} \sim 10^{-4}$  Pa, 以确保真空度在  $10 \sim 10^{-1}$  Pa 条件下, 真空淬火油不会产生明显的挥发。

(2) 杂质与残炭少,酸值低。真空油淬火后,零件表面光亮度应不低于标准试样的 70%。

(3) 临界压强(即得到与大气压下有相同淬火冷却能力的最低压强)低,冷却性能好,要求工件在真空淬火油中冷却后,能达到与在常压下淬火相同的硬度值。

(4) 热稳定性好,即抗老化性能好,使用寿命长。

### 2. 真空淬火油的主要技术指标

国内外常用的真空淬火油有美国海斯公司 H<sub>1</sub> 油、H<sub>2</sub> 油;日本初光工具公司的 HV<sub>1</sub> 油、HV<sub>2</sub> 油和我国的 ZZ-1、ZZ-2 真空淬火油。部分真空淬火油的主要技术指标见表 2-18、表 2-19。

表 2-18 国产真空淬火油技术指标

真空淬火代号	ZZ-1	ZZ-2
黏度(50℃)(10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)	20~25	50~55
闪点(℃)不低于	170	210
凝点(℃)不高于	-10	-10
水分(%)	无	无
残炭(%)不大于	0.08	0.1
酸值(mgKOH/g)	0.5	0.7
饱和蒸汽压(20℃)(133 Pa)	5×10 <sup>-5</sup>	5×10 <sup>-5</sup>
热氧化安定性	合格	合格
冷却性能: 特性温度(℃)	600~620	580~600
特性时间(s)	3.0~3.5	3.0~4.0
800℃冷至 400℃的时间(s)	5~5.5	6~7.5

表 2-19 美国真空淬火油技术指标

真空淬火油代号	H <sub>1</sub>	H <sub>2</sub>
密度(×10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	0.882	0.862
黏度指数	76	95
黏度(100°F)(赛氏黏度)	92~95	110~121
着火点(℃)	170	190
热线试验	34.0	31.0
蒸汽压: 40℃(×133 Pa)	0.002	0.000 1
90℃(×133 Pa)	0.100	0.010 3
150℃(×133 Pa)	2.00	0.45
GM 淬火试验(s)(参见表 6-15)	11	17
最高使用温度(℃)	60	80

### 3. 真空油淬时应注意的问题

(1) 真空油淬火时,如油面压强很低,接近油的沸腾状态,会使冷却能力下降,达不到预期的淬硬效果。因而,必须在真空加热后工件入油前后向炉内充填惰性气体,使液面形成一定压强,才能实现有足够淬火硬度和良好光亮度的真空油淬效果。图 2-10 为淬火硬度和随淬火前油面不同压强的变化关系。对不同淬透性的钢应选取不同的油面压强。淬火时还应注意的是淬火室充气与淬火入油的先后顺序,对于淬透性差的钢种应采

用先充气后人油的方式淬火,对于淬透性较好的钢种可采用先入油后充气方式淬火,具体工艺的选择取决于钢材特性。

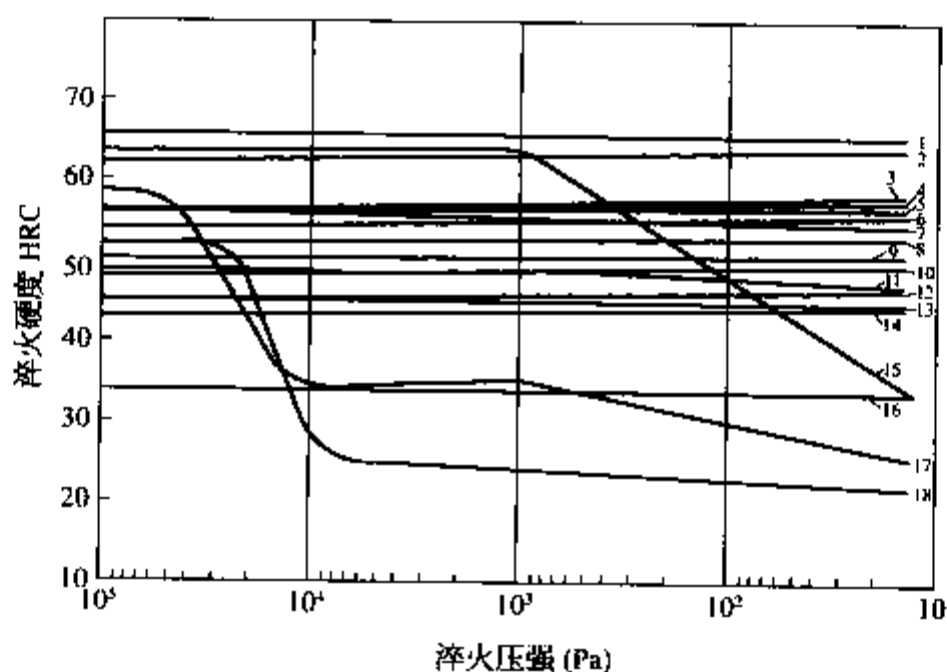


图 2-10 部分钢在 ZZ-1 真空淬火油中的淬火硬度与油面压强的关系

1—Cr12MoV; 2—60Si2MnA; 3—40CrNi2Si2MoVA; 4—40CrMnSiMoVA; 5—37CrNi3A; 6—40CrA;  
7—40CrNiMoA; 8—38CrMoAlA; 9—30CrMnSiNi2A; 10—1Cr11Ni2W2MoVA; 11—30CrMnSiA;  
12—Cr17NiA; 13—18Cr2Ni4WA; 14—1Cr13; 15—65Mn; 16—T8A; 17—12CrNi3A; 18—45

另外,油面压强对淬火畸变亦有极大影响。降低油面压强,可使淬火畸变显著减轻。因此,淬火油面压强的选择,应在保证淬火硬度和淬透层的前提下,尽可能低一些为佳。

一般淬火前压强应提高到 26 kPa 以上,工艺上常采用向冷却室回充氮气,压强为 0.04~0.05 MPa(常用 40~67 kPa,高于 67 kPa 对冷却特性影响就不显著了)。淬火前压强接近 0.1 MPa,可得到高的淬火硬度,充氮气有利于安全操作。

(2) 为满足冷却能力的要求,真空炉需要有足够的油量,一般取工件(包括料盘)质量与油量之比 1:10~1:15。油槽容积应比油与工件体积之和大 15%~20%以上。

(3) 真空淬火油的品质,如酸值、残碳、水分、离子量都可能使工件严重着色。有时它对光亮度的影响大于真空度的影响。使用过程中需定期分析黏度、闪点、冷却性能和水分。当真空油中水的质量分数达 0.03%时,就会使工件表面变暗。当水的质量分数达 0.3%时,油的冷却特性将明显改变,低温区冷速变大,易使形状复杂的工件开裂。当液面压强降低时,含水的油面将发生沸腾,从而严重破坏真空度。

(4) 新油第一次使用时需进行脱气处理。脱气处理操作步骤:将炉门关闭,启动机械真空泵抽真空及开动油槽内的油搅拌器,从观察孔中观察油面情况。当油面沸腾并上升且有溢出油槽的趋势时需立即关闭真空阀门。当降压至 46 550 Pa(350 Torr)时,关闭真空阀门并保持 5 min 以上,然后打开真空阀门使真空室压强再降至 39 900 Pa(300 Torr)时,仍保持 5 min 以上。按此方式,使真空室中压强逐渐降低下来。在压强降至 6 650 Pa(50 Torr)之后可使压强每次降低得少些,直至达到最低压强值为止。经此脱气处理后的淬火油就可以使用。

(5) 每次停炉后,还应使炉子保持真空状态(39 900 Pa 即 300 Torr 以下),防止空气和水分再次溶入。

(6) 真空淬火油应在 40~80℃使用。温度过低,油的黏度大,冷却速度低,淬火后工件硬度不均,表面不光亮。油温过高,油会迅速蒸发,从而造成污染并加速油的老化。油槽中还应装设冷却器,油的温升控制在 25℃以内。

(7) 为能迅速调节油温并使油温均匀,油槽中还应装设搅拌装置以加强油的循环和对流。静止油冷却烈度为 0.25~0.30,激烈搅拌的油为 0.8~1.1。但油搅拌过于强烈,易使工件产生大的畸变,应控制工件入油后的开始搅拌时间,调节搅拌的激烈程度,并实现断续搅拌,可减少畸变和软点。

(8) 真空油淬时的高温瞬时渗碳现象。高速工具钢经真空油淬后在工件表面出现大量残留奥氏体和碳化物组成的白亮层,无法用 560℃正常的回火温度加以消除,一般需在 700℃以上甚至 800℃左右才能消除。这是

由于淬火油在与高温工件(900~1 200℃)接触后分解产生 CO、CH<sub>4</sub>,这些渗碳气体将受热分解并析出浓度较高的活性碳,渗入到活性较好的工件表面层中,产生瞬间渗碳现象。出现的白亮层厚度达 35~50 μm。工件入油温度愈高,则白亮层愈厚,淬火油的温度愈高,白亮层也愈厚。当油温为 20℃、工件入油温度低于 880℃时,可以减少或防止白亮层的产生。但预冷时间过长会出现碳化物析出,使高速钢热硬性降低,在回火时不会出现二次硬化现象。所以,高速钢、高合金钢的真空油淬如今已被高压气淬所取代。

(9) 为了确保真空油淬操作的安全性,防止发生爆燃事故,应注意下列事项:

① 当工件加热结束,通过热闸门进入淬火室后,随即关闭热闸门,此时加热室一定要继续抽真空,保证在淬火过程中热室真空度始终高于冷室,使两室之间处于良好的隔热密封状态。

② 工件入油冷却过程中,油冷室应充入(4~6.7)×10<sup>4</sup> Pa 的氮气,以保持油面压强,既有利于提高工件淬火硬度,又可抑制淬火油的挥发,降低冷却室内油雾浓度。

③ 经常注意检查油槽中油位的高度,并及时补充添加,保证淬火工件浸没于油面以下有足够的深度。

④ 工件必须经充分冷却后,才能提升、出油沥干,并对油冷室抽真空,以去除油冷室上方的油雾气,然后才能关闭真空阀门,放气出炉。

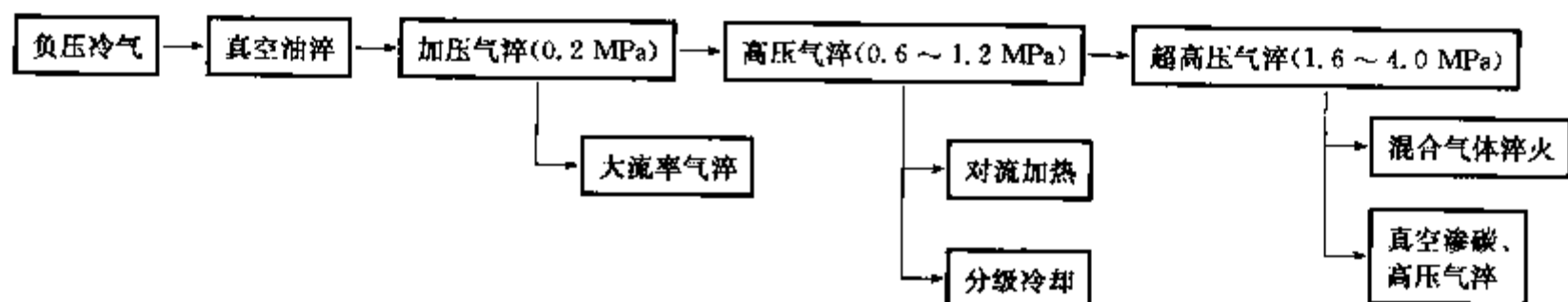
⑤ 对不允许充分冷透的工件,出油后工件需在气冷室停留足够时间,使油雾气经冷凝成油滴回到油槽,并对油冷室抽真空,去除油雾气,然后才能放气开炉门。

⑥ 对大型模具,更安全的方法是:工件出炉前对冷室抽真空,去除油雾气后,再向冷室充入氮气至 0.1 MPa,随后开炉门卸料。

## (二) 真空气淬

### 1. 真空热处理技术的发展过程

早期仅着眼于零件的表面质量,实现无氧化加热。随后围绕不断提高淬火冷却能力和减少淬火畸变,进而发展到扩大真空热处理技术的应用范围。其发展过程大致可归纳为:



高压气淬炉炉室冷却气流的发展过程如图 2-11 所示。

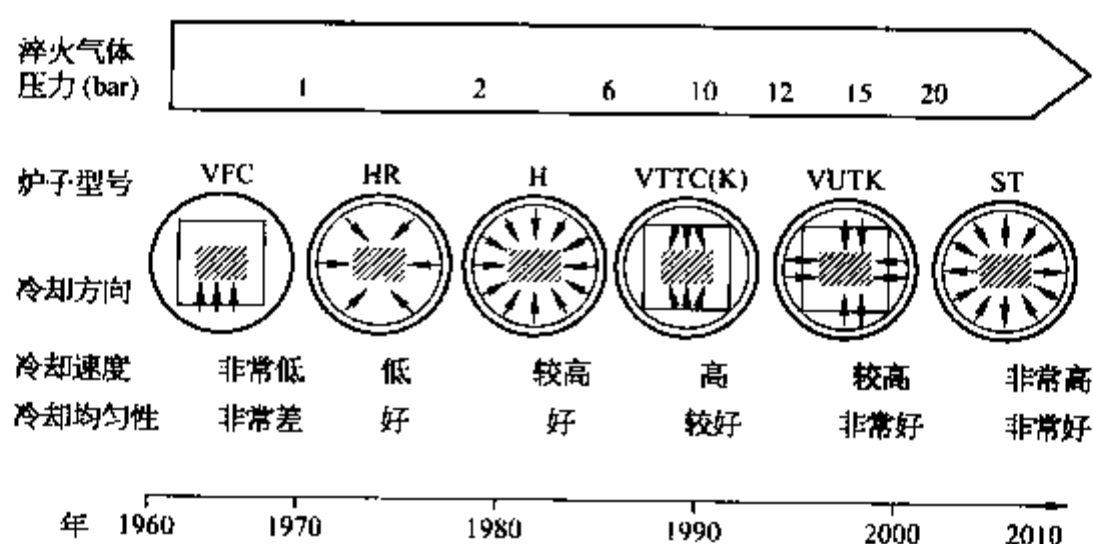


图 2-11 高压气淬炉冷却方式的发展过程

(国外真空炉大多采用压强 bar 为单位,本文内不换算为标准法定计量单位)

### 2. 气淬介质的选择

真空气淬的冷却速度与气体种类、气体压强、流速、炉子结构及装炉状况有关。可供使用的冷却气体有氩、氮、氦、氖,它们在 100℃时的某些物理特性见表 2-20。

表 2-20 各种冷却气体的性质(100℃)

气 体	密度(kg/m <sup>3</sup> )	普朗特数	动力黏度(Pa·s)	热导率 [W/(m·K)]
N <sub>2</sub>	0.887	0.70	2.15×10 <sup>-5</sup>	0.031 2
Ar	1.305	0.69	27.64	0.020 6
He	0.172	0.72	22.1	0.166
H <sub>2</sub>	0.063 6	0.69	10.48	0.220

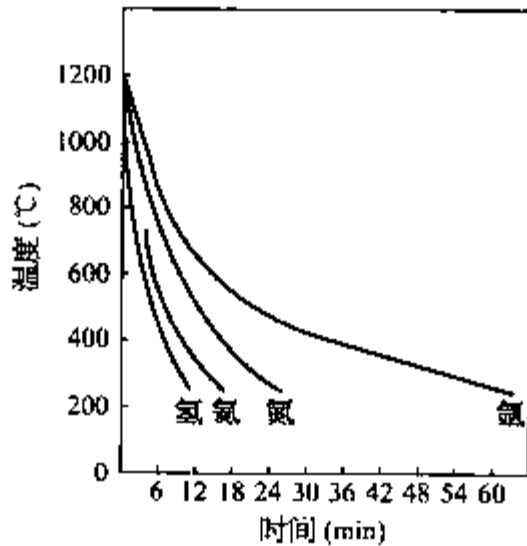


图 2-12 氦、氩、氢、氮的相对冷却性能曲线

与相同条件下的空气传热速度相比较,以空气为 1,则氮气为 0.99,氩为 0.70,氢为 7,氦为 6。图 2-12 为常用惰性气体的相对冷却性能曲线,由图可见,氦气的冷却速度最快。但是在 1 058℃ 以上,钢在氢中容易造成轻微脱碳,对高强度钢有造成氢脆的隐患。同时,氢有爆炸的危险,从安全角度来看,一般不采用氢气冷却。氩的价格太贵,影响应用。氮气冷却速度最差,而且价格也贵,只能作为氮的代用气体使用。氮气资源丰富、成本低、使用安全,在 200~1 200℃ 范围内氮对常用钢材呈惰性状态,从而得到广泛的使用。在某些特殊条件下,如对于易吸气并与氮气反应的钛锆及其合金,一般采用氩气作为冷却介质。

为了保证工件表面不氧化,并具有高的光亮度,真空气淬时对氮气的纯度标准有一定的要求,见表 2-21。

表 2-21 氮气纯度标准

处理材料	轴承钢、高速钢	高温耐热合金	高温活性金属	半导体材料
氮气纯度(体积百分比,%)	99.995~99.998	99.999	99.999 9	99.999 99

为保证热处理质量,全国热处理标准化技术委员会制订了热处理用氦气、氢气、氮气的行业标准。见表 2-22。

表 2-22 热处理用氦气、氢气、氮气的行业标准

名 称	指标要求(体积百分比,%)						
	氦含量	氮含量	氧含量	氧含量	总碳含量(以甲烷计)	水含量	
高纯氦气	≥99.999	≤0.000 5	≤0.000 1	≤0.000 2	≤0.000 2	≤0.004	
氦 气	≥99.99	≤0.007	≤0.000 5	≤0.001	≤0.001	≤0.002	
高纯氮	—	≥99.999	≤0.000 1	≤0.000 3	≤0.000 3	≤0.000 5	
纯 氮	—	≥99.996	≤0.000 5	≤0.001	CO≤0.000 5 CO <sub>2</sub> ≤0.000 5 CH <sub>4</sub> ≤0.000 5	≤0.000 5	
工业用气态氮	I类	—	99.5	—	≤0.5	—	露点≤-43℃
	II类 I级	—	99.5	—	≤0.5	—	游离水≤100 mL/瓶
	II类 II级	—	98.5	—	≤1.5	—	游离水≤100 mL/瓶
氢 气	—	≤0.006	≥99.99	≤0.000 5	CO≤0.000 5 CO <sub>2</sub> ≤0.000 5 CH <sub>4</sub> ≤0.001	≤0.003	

注: 1. 15℃水分压,在大于 11.8 MPa 条件下测定。

2. 高纯氮、纯氮不适合作为沉淀硬化型不锈钢、马氏体时效钢、高温合金、钛合金等的真空热处理回充和冷却气之用。

3. 氢气不适用于高强度钢、钛合金、黄铜的热处理保护。

4. 液态氮不规定水的含量。

## 3. 影响真空气淬冷却性能的因素(表 2-23)

表 2-23 影响气淬冷却性能的因素

真空炉设计特性(固有)	气体的冷却性能	淬火工件的条件(可变)
单室/双室,最大冷却压强,热室结构尺寸,喷嘴结构数量,水冷却方式,热交换器效率,风扇结构、尺寸,风机马达功率	气体类型,循环路径,气流方向,选用气冷压力,喷气速率,气体热容量,气体热传导率,紊流度、黏滞度	工件材料,形状尺寸,表面积,工件摆放,装炉量,料筐结构

## 4. 真空气淬炉的冷却能力

关于各种气体淬火的冷却能力,可用传热系数进行比较,见表 2-24。由表可见,冷却压强为  $6 \times 10^5$  Pa 的循环  $N_2$ ,流速  $60 \sim 80$  m/s 时已达到  $550^\circ\text{C}$  盐浴分级冷却的能力;炉压达  $20 \times 10^5$  Pa 的循环  $H_2$  或  $He$  的冷却能力可达到静止油的水平; $40 \times 10^5$  Pa 的  $H_2$  的冷却能力接近于水淬。

表 2-24 各种淬火介质对传热系数的比较

冷却介质和淬火参数	传热系数 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]	冷却介质和淬火参数	传热系数 [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]
盐浴 $500^\circ\text{C}$ 分级冷却	350~450	$10 \times 10^5$ Pa $N_2$ 快速循环	400~500
流态床	400~500	$6 \times 10^5$ Pa $He$ 快速循环	400~500
油( $20 \sim 80^\circ\text{C}$ )静止	1 000~1 500	$10 \times 10^5$ Pa $He$ 快速循环	550~650
油( $20 \sim 80^\circ\text{C}$ )搅拌循环	1 800~2 200	$20 \times 10^5$ Pa $He$ 快速循环	900~1 000
水( $15 \sim 25^\circ\text{C}$ )	3 000~3 500	$6 \times 10^5$ Pa $H_2$ 快速循环	450~600
空气无强力循环	50~80	$10 \times 10^5$ Pa $H_2$ 快速循环	~750
$1 \times 10^5$ Pa $N_2$ 循环	100~150	$20 \times 10^5$ Pa $H_2$ 快速循环	~1 300
$6 \times 10^5$ Pa $N_2$ 快速循环	300~400	$40 \times 10^5$ Pa $H_2$ 快速循环	~2 200

通用的高压气淬炉在不同工作情况下冷却能力的比较见图 2-13~图 2-15 及表 2-25。

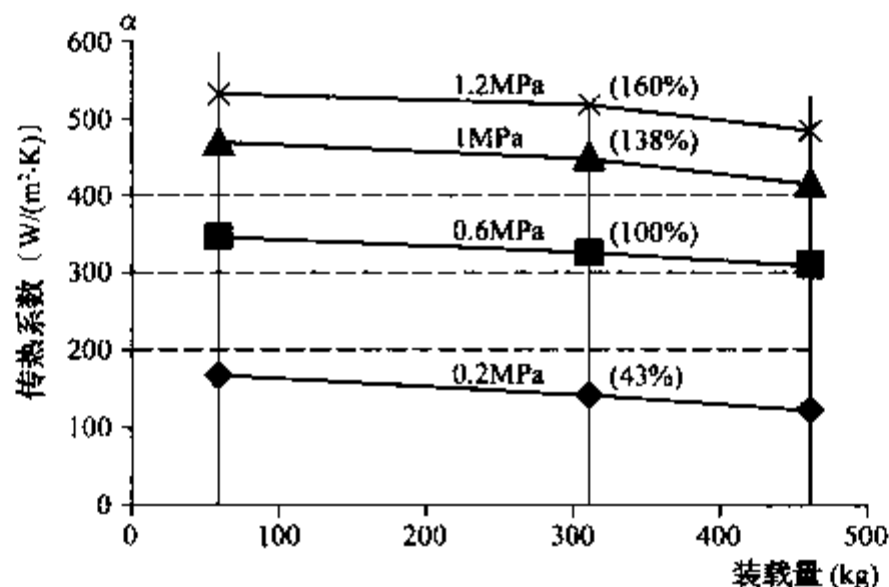


图 2-13 不同气淬压强下传热系数的比较

炉型: Turbo Treat (610 mm×610 mm×910 mm)全石墨热室

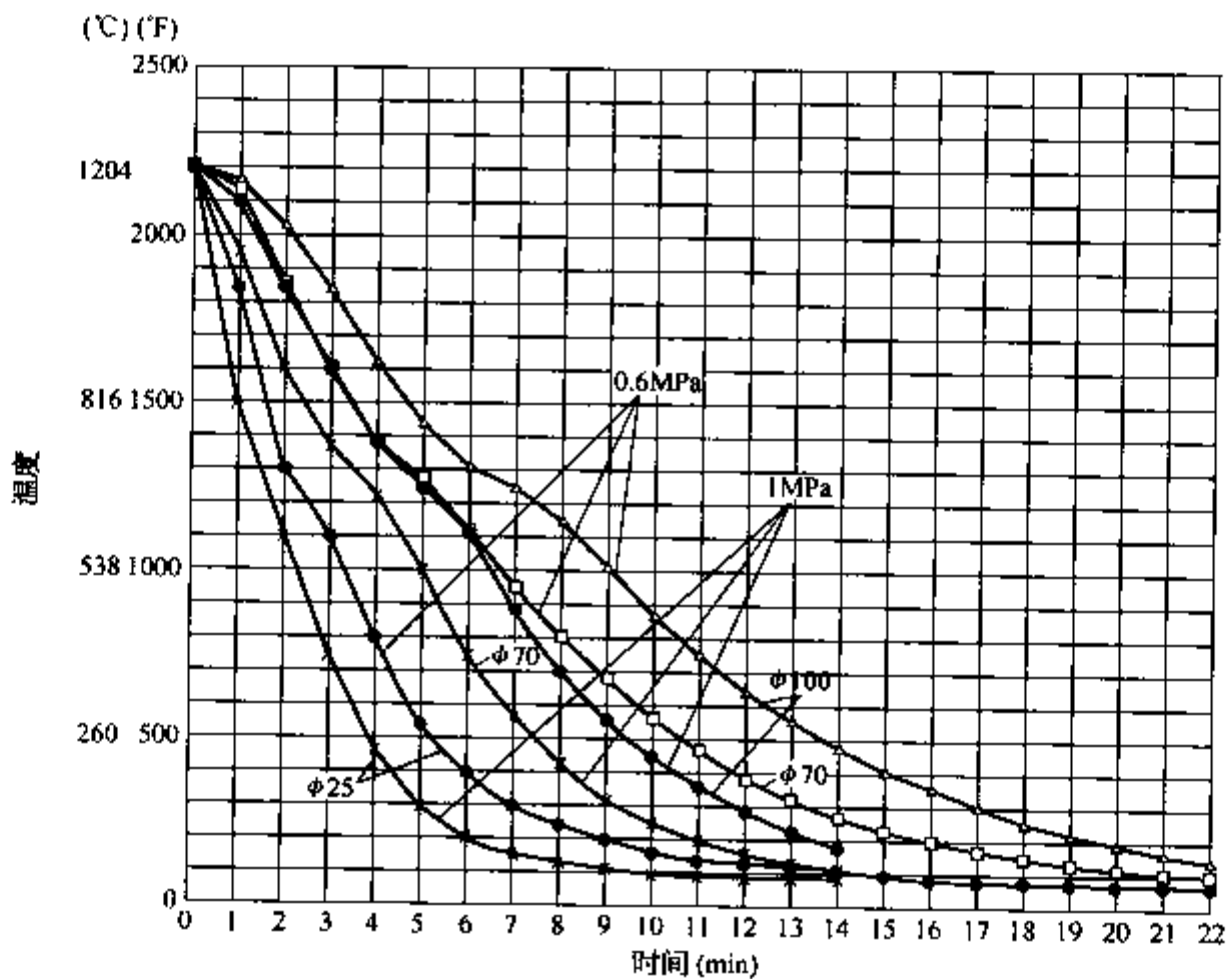


图 2-14 气淬压强 0.6 MPa 与 1 MPa 的冷却速度对比(N<sub>2</sub>冷却)

- 注: 1. 炉型: H3636(610 mm×610 mm×910 mm)(全石墨热室);
- 2. 温度为工件心部热电偶指示温度;
- 3. 装炉量 600 lb(272 kg)2 层装料;
- 4. 试件尺寸: φ25 mm×L 100 mm, φ70 mm×L 75 mm, φ100 mm×L 100 mm

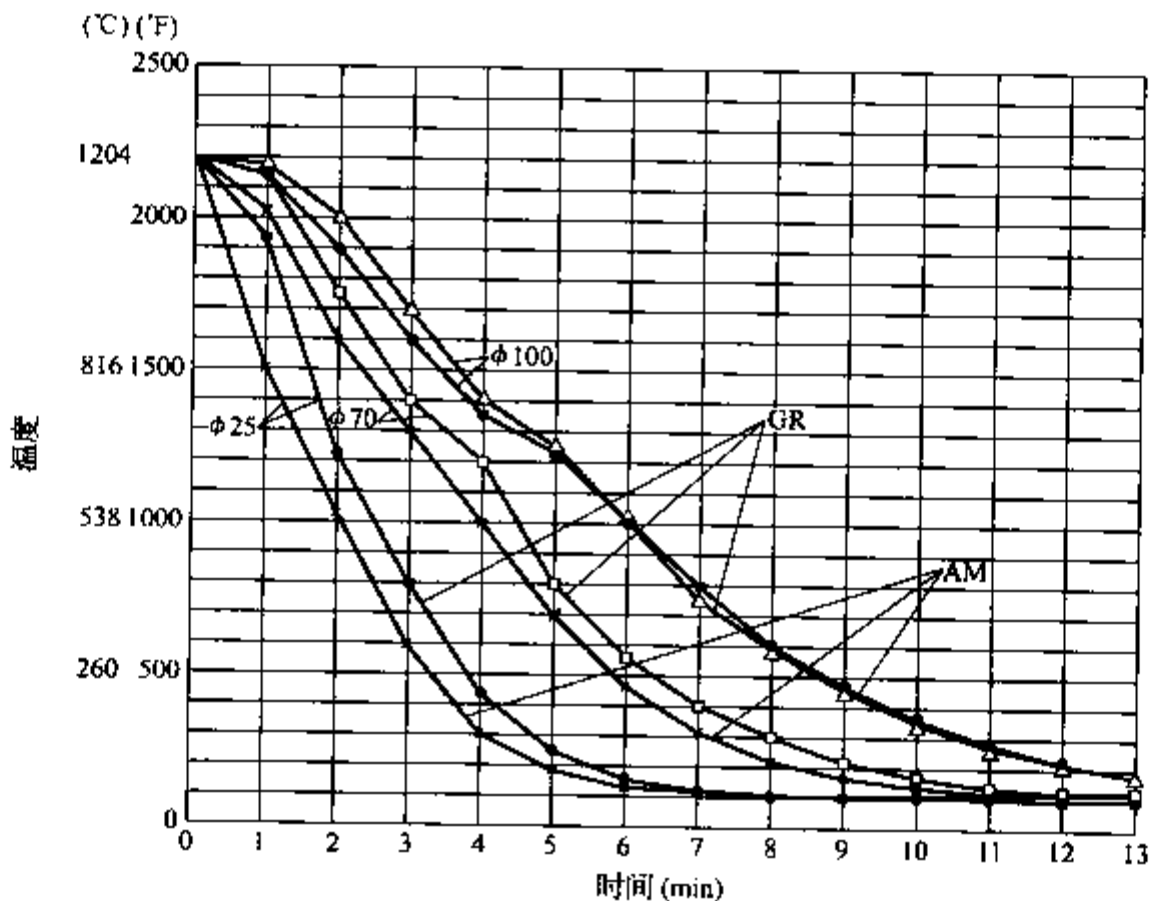


图 2-15 石墨热室(GR)与全金属屏热室(AM)冷却速度的对比(1 MPa N<sub>2</sub>)

- 注: 1. 炉型: H3636(610 mm×610 mm×910 mm);
- 2. 温度为工件的心部热电偶指示温度;
- 3. 装炉量 600 lb(272 kg)2 层装料;
- 4. 试件尺寸: φ25 mm×L 100 mm, φ70 mm×L 75 mm, φ100 mm×L 100 mm

表 2-25 真空高压气淬的淬硬能力

AISI (美)	AFNOR (法)	DIN (德)	GB (中)	主要成分(质量分数,%)						相应压力下的 淬硬尺寸(mm)			硬度 HRC	
				C	Cr	Ni	Mo	V	W	0.6 MPa	1 MPa	2 MPa		
	—	50NiCr13	—	0.45~0.55	0.09~1.20	3.00~3.50					80	100	120	59
	—	X45NiCrMo4	—	0.40~0.50	1.2~1.5	3.8~4.3	0.15~0.35				160	180	200	56
01	90MWCv5	100MnCrW4	MnCrWV	0.90~1.05	0.5~0.7	Mn1.0~1.2		0.05~0.15	0.5~0.7		40	80	120	64
S1	55WC20	60WCrV7	5CrW2Si	0.55~0.65	0.9~1.2			0.15~0.20	1.8~2.1		60	80	100	60
02	90MV8	90MnCrV51	9Mn2V	0.85~0.95	0.2~0.5	Mn1.9~2.1		0.05~0.15			40	80	120	63
A2	Z100CDV5	X100CrMoV51	Cr5Mo1V	0.90~1.05	4.80~5.50		0.90~1.20	0.10~0.30			160	200	200	63
D3	Z200C12	X210Cr12	Cr12	1.90~2.20	11.0~12.0						60	100	160	64
D6	Z200CW12	X210CrW12	—	2.0~2.25	11.0~12.0				0.60~0.80		160	200	200	65
D2	Z160CDV12	X155CrVMo121	Cr12MoV	1.50~1.60	11.5~12.5		0.60~0.80	0.90~1.10			160	200	200	63
L6	55NCDV7	55NiCrNiMoV6	5CrNiMo	0.50~0.60	0.60~0.80	1.50~1.80	0.25~0.35	0.07~0.12			100	160	200	56
L6	55NCDV7	56NiCrMoV7	5CrNiMo	0.50~0.60	1.00~1.20	1.50~1.80	0.45~0.55	0.07~0.12			120	200	200	57
H11	Z38CDV5	X38CrMoV51	4Cr5MoSiV	(H11)							160	200	250	54
H13	Z40CDV5	X40CrMoV51	4Cr5MoSiV1	(H13)							160	200	250	54
H10	32DCV28	X32CrMoV33	—	(H10)							100	140	160	50
H10A	30DCKV28	X32CrMoV333	—								160	200	200	52
420	Z40C14	X42Cr13	40Cr13	0.38~0.45	12.5~13.5							100	120	55
—	—	X36CrMo17	—									140	160	50
M2	Z85WDCV 06-05-04-02	S6-5-2	W6Mo5Cr4V2	0.84~0.92	3.8~4.5		4.70~5.20	1.70~2.00	6.00~6.70		100	120	150	65
M42	Z110DKCWV 09-08- 04-02-01	S2-10-1-8	W2Mo9Cr4VCo8	1.05~1.12	3.60~4.40	Co 7.50~8.50	9.00~10.0	1.00~1.30	1.20~1.80		120	150	180	66
M48	Z130WKCDV 10-10- 04-04-03	S10-4-3-10	—	1.20~1.35	3.8~4.5	Co 10.0~11.0	3.50~4.00	3.00~3.50	9.50~11.00		120	150	180	67
E52100	100C6	100Cr6	GCr15	0.95~1.10	1.35~1.65						—	10	20	63
—	35NCD6	34CrNiMo6	35Cr2Ni2MoA	0.30~0.38	1.40~1.70	1.40~1.70	0.15~0.30				20	40	60	54
—	—	100CrMo73	—	0.90~1.05	1.65~1.95		0.20~0.40				5	10	25	64



### (三) 其他冷却方法

- 1) 随炉冷却或控制冷却速度的缓慢冷却 适用于电工合金、磁性材料和一般材料的真空退火。
- 2) 为减少工件畸变而采用的分级冷却。

3) 真空水淬 有色金属、耐热金属、钛合金及碳钢需要在水中激冷。纯水的三相点是  $0.0098^{\circ}\text{C}$ 、饱和蒸汽压为  $610.53\text{ Pa}$ 。水温上升,饱和蒸汽压也升高, $20^{\circ}\text{C}$ 的水为  $2333.3\text{ Pa}$ , $60^{\circ}\text{C}$ 的水为  $19920\text{ Pa}$ 。在低气压下水将迅速蒸发,从而破坏真空。所以,水淬用的真空炉一般在前室到淬火水槽之间再增加一个真空阀门,使水槽与前室隔开。当淬火加热时水槽应先抽真空至  $5\times 10^1\text{ Pa}$ ,再充入氩气或氮气以降低氧的分压。工件加热完毕后在打开热闸门前,向加热室和前室充入氩(一般钢材可充入氮气)至  $6\times 10^1\text{ Pa}$ ,使之与水槽的压力平衡,之后迅速打开前室与加热室和前室与水槽之间的真空阀门,工件在几秒钟内立即淬入循环的水中。目前国内使用真空水淬的工艺不多。

4) 真空硝酸盐淬火 采用硝酸盐等温或分级淬火可以使工模具减少畸变和开裂,再加上真空脱气的效果,可以使工件使用寿命得到提高。如  $30\text{CrMnSiNi2A}$  钢真空硝酸盐等温淬火后,其多次冲击疲劳总寿命比常规淬火工艺高  $1.56\sim 1.92$  倍。常用的硝酸盐成分是  $\text{NaNO}_2(45\%)+\text{KNO}_3(55\%)$ ,在真空下它将迅速蒸发,浴温越高,蒸发越剧烈。如在  $133\text{ Pa}$ 、 $320^{\circ}\text{C}$  条件下硝酸盐的蒸发量为  $4.673\text{ mg}/(\text{cm}^2\cdot\text{h})$ 。 $\text{NaNO}_2$  在  $320^{\circ}\text{C}$  开始分解, $\text{KNO}_3$  在  $550^{\circ}\text{C}$  以上急骤分解。所以,应尽可能在低温使用,并应在  $260\sim 280^{\circ}\text{C}$  或达到工作温度时继续排气,以清除杂质及水汽。加以搅拌可以提高盐浴冷却能力,如  $204^{\circ}\text{C}$  时静止盐浴的冷却烈度为  $0.5\sim 0.8$ ,激烈搅动时可达  $2.25$ 。搅动还可以防止工件周围介质局部过热。用氮气或氩气提高盐浴液面压力和反复充气至大气压以稀释盐浴槽上方的气氛,可以提高冷却能力并减少硝酸盐蒸汽对设备的腐蚀。

静止硝酸盐浴总的冷却能力与油相近。一般在  $M_s\sim M_s+30^{\circ}\text{C}$  等温冷却,可获得满意的强度和韧性组织。在硝酸盐浴中停留的时间为工件冷至硝酸盐温度的时间加上等温温度下工件内外温度均匀的时间以及在 C 曲线上查得的转变所需时间的总和。

## 四、真空气淬热处理技术的发展动向

1) 真空加热技术上采用循环对流加热装置 对流用风扇一般设置在前炉门内,也有置于炉侧面的。在  $850^{\circ}\text{C}$  工件预热阶段启动对流小风扇,使炉压在  $2\text{ bar}$  氮气下进行对流换热,以缩短预热时间,提高生产效率。

对流加热的优点有:

- (1) 每炉淬火加热时间约可缩短  $1/3$  周期。例如直径  $105\text{ mm}$  的零件预热至  $700^{\circ}\text{C}$ ,真空辐射加热需  $110\text{ min}$ ,对流加热只需  $85\text{ min}$ ,见图 2-16。
- (2) 工件加热过程中,温度更趋均匀,可减少热应力及畸变。
- (3) 淬火、回火可在同一炉中进行,回火时仍可对流循环,以提高回火质量。

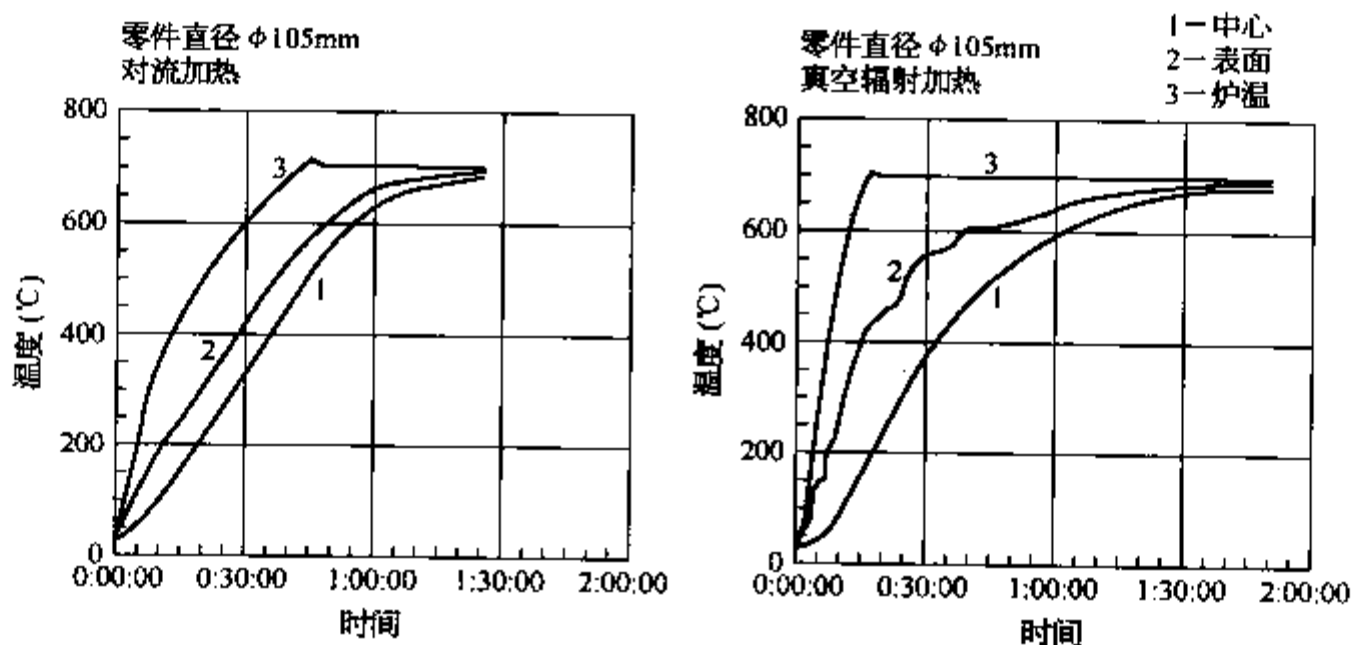


图 2-16 对流加热与真空辐射加热的对比

2) 气冷压强不断在提高 从气体传热公式:  $\alpha = k(p \cdot v)^{0.8}$  来看, 增加炉内气冷压强  $p$  与增加气体流速  $v$  对气冷效果是一样的。当前高压气淬炉则由通常的 0.6 MPa 压强普遍提高至 1 MPa, 甚至已达 1.2~2 MPa, 它们广泛应用于高合金工模具钢, 并取得了良好冷却与硬化效果。另外, 由于高流率气淬炉可节约氮气, 炉壳制造不需要按高压要求, 故外循环高流率气冷真空炉有一定的应用。但当要求更高冷却速度时, 高流率气淬炉受到以下两个方面因素的制约:

(1) 系统压力损失与气流流速的平方成正比, 增加流速时炉内压力损失大。

(2) 气流流速的提高受风机功率限制, 鼓风机功率与气体体积流速的三次方成正比, 这对风机结构设计和启动均会造成很大困难。因此, 高流率气淬炉炉压通常为 0.2 MPa, 气体流速为 40~60 m/s, 而且多采用外循环冷却方式。

3) 炉内的冷却气体流动方式的改进 良好的气流方式可获得更快的冷却速度及较好的温度均匀性, 可为大型模具或密集装载工件提供最快的淬火速率和最佳的冷却均匀性, 从而使工件获得理想的显微组织和最小的畸变。近代的高压气淬炉冷却模式有上下左右四个气流通道(图 2-17、图 2-18), 图 2-18 所示的真空炉在装载 3.6 t 的航空起落架(3 件)时的最大淬火变形量由原底装炉的 20.3 mm 减少至 4.3 mm, 气冷压强为 1.5 MPa。

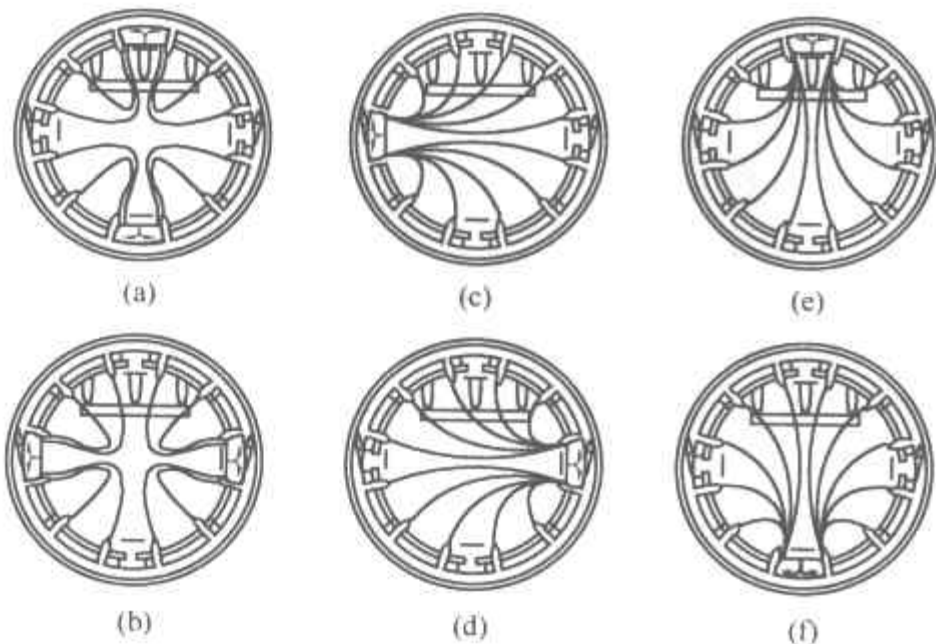


图 2-17 高压气淬冷却模式

(a)、(b) 上下、左右交替喷气; (c)、(d) 左右交替喷气;  
(e)、(f) 上下交替喷气

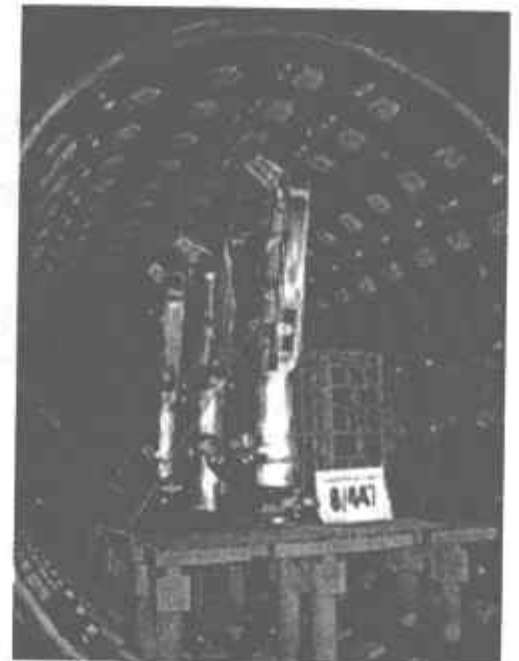


图 2-18 波音飞机起落架真空气淬装料图

4) 采用具有强冷能力的混合气体冷却(图 2-19、图 2-20) 这是提高气淬冷却能力的另一途径, 惰性气体的冷却能力依次是  $H_2-He-N_2-Ar$ , 氮气应用最广泛, 氢气因安全问题, 应用受到限制。尽管氦气价格是氮气的 10 倍, 但氦气的传热系数是氮气的 5.8 倍, 而气体密度仅为氮气的 14%, 所以在气冷压强由 0.6 MPa 增加到 2 MPa 时, 热交换系数增加 40%, 而风机功率仅为氮气的 10%。又发现, 采用 2/3 氦气与 1/3 氮气的混合气体具有最佳的气冷效果, 而且成本较低(但应有混合气回收装置)。试验表明: 2 MPa 氦气冷却速度可超过静止油冷速, 而 4 MPa 氢气冷却速度则接近水淬冷速, 这就使碳钢、低合金钢零件采用真空气淬成为可能。

5) 冷却风机及其启动方式的改进(图 2-21) 为进一步提高冷速, 生产中常相应增大冷却风机的功率, 如工作室尺寸为 600 mm×600 mm×900 mm 的 1.2 MPa 气淬炉, 风机功率达 300 kVA。随之, 对风机的启动方式进行了改进, 采用提前 1 min 在真空下低电流小功率的 LCP 法启动, 其电流小于额定电流的 2.5 倍。同时对叶轮结构也作了改进。

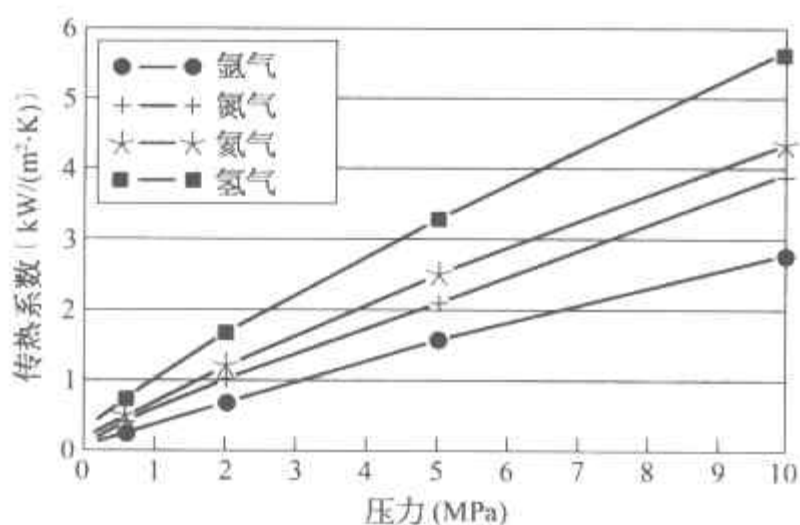


图 2-19 各种冷却气体换热能力的比较

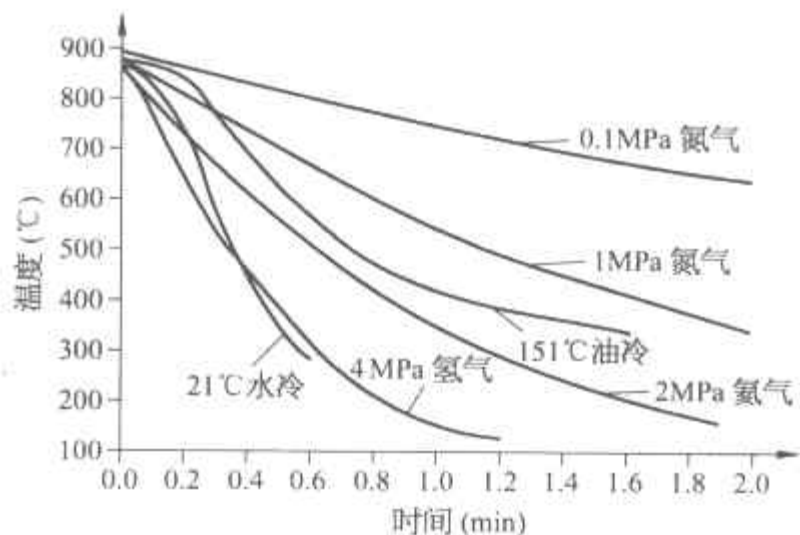
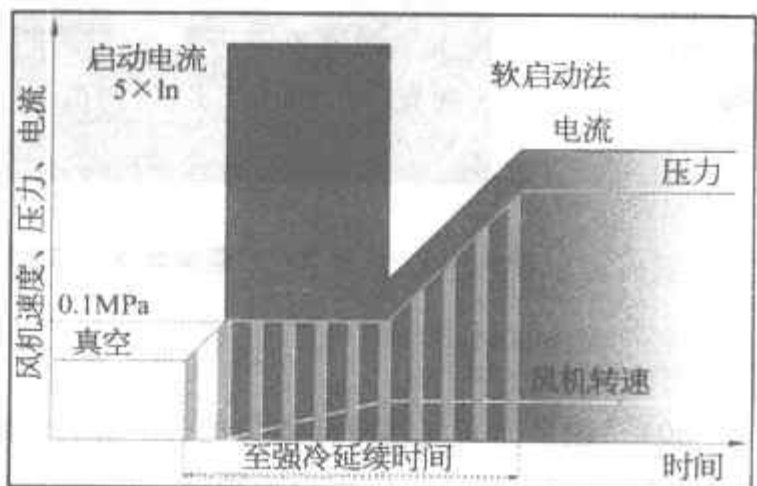
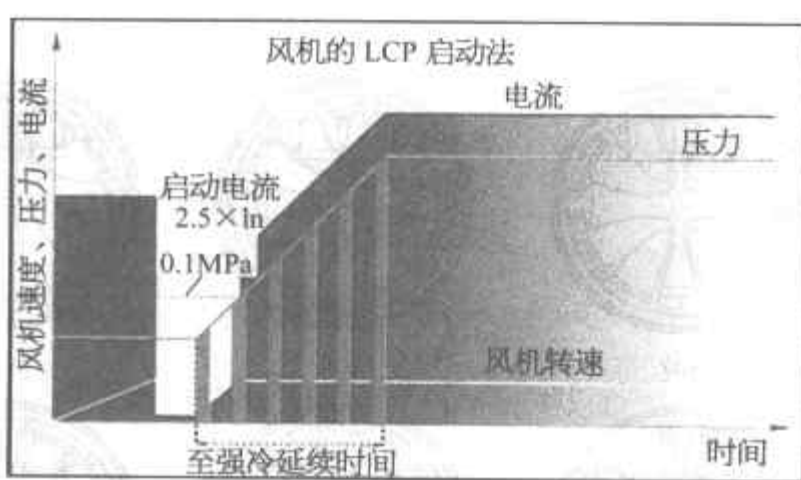
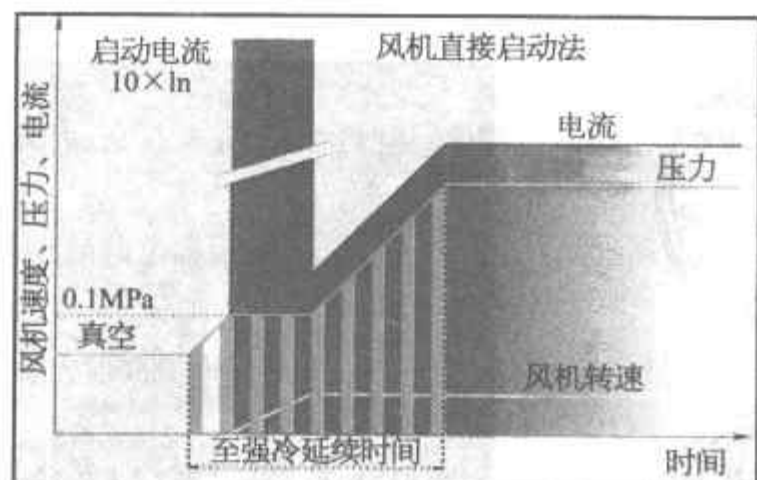


图 2-20 各种冷却介质冷却曲线的比较 (φ40 圆钢)  
(气体流速 20 m/s, 气体温度 20°C)



1. 传统方法(直接启动和软启动)是充气后风机才启动;
2. LCP 启动法风机在真空下提前 1 min 启动, 淬火瞬间已全速运转, 大大提高了淬火冷却速率;
3. LCP 启动电流小于常规额定电流  $I_n$  的 2.5 倍

图 2-21 三种风机启动方式的比较

6) 开发双室高压气淬真空炉, 以提高冷却效率 双室真空炉将加热室和冷却室分开, 使工件在真空室加热结束后转移到气冷室冷却, 减少了热室构件的冷却, 不但提高了气淬冷却能力, 而且提高了热效率, 节约了电能, 缩短了生产周期。其缺点是炉室结构复杂, 在高温态移动会增加工件畸变和延长转移时间。双室气淬炉比较适合尺寸较小的工件; 处理较重的模具时, 工件的传送会显得困难。

7) 具有分级冷却功能的高压气淬炉 该炉型能满足大型模具高压气淬的需要, 同时能减少模具畸变、开裂的风险和隐患。目前, 这类分级等温冷却的方法有以下几种:

(1) 风机带有双速电机, 在第一阶段快冷时, 风机的电机转速 2 800 r/min; 其后按热电偶反馈的温度

信号或预先设定的时间自动切换至 1 400 r/min(或更低的转速),也可以通过变频连续调风机转速,实施缓冷。

(2) 通过调节大小风机的运行程序实施分级冷却。

(3) 带有控制冷却装置和分级冷却软件程序,按工件热电偶信号,自动调节循环冷却气流通道的大小,实施分级淬火。

(4) 双室真空气淬炉,在冷却室内实施分级缓冷。

对 H13 钢压铸模,特别是质量在 500 kg 以上或有效厚度 $\geq 250$  mm 的大模具,在高压气淬时必须应用分级冷却工艺,而且冷却压强必须 $\geq 1$  MPa,这样才能获得较理想的显微组织和最小的畸变并且避免淬火开裂现象。

8) 工艺过程的智能化控制系统 高压气淬真空热处理设备是综合性强、跨学科多的高新设备,它结合了真空技术、高温绝热材料、真空测量技术、自动控制、信息传感技术、计算机等高新技术与热处理技术,建立起计算机的工艺过程智能化控制,使传统的热处理技术有了质的飞跃,可以进行远程控制和网络管理,实现真空热处理工艺和设备的柔性化和连续操作,并最终将热处理设备安置作为一个工位到流水生产线上。

9) 设备上致力于节能降耗、降低运行成本 目前这方面的改进有:

(1) 采用过载能力大的新型双速水冷电机,在淬火强冷阶段短时(30 min)过载能力可达 250%(涡轮电机仅 30%),对炉室尺寸为 600 mm $\times$ 600 mm $\times$ 900 mm 的真空炉其电机额定功率可由原 160 kW 减至 115 kW,而仍保持原冷却能力。

(2) 采用 LCP(低电流、低功率法)启动技术,使气冷风机马达的启动电流峰值降至约为 2.5 倍的额定电流(常规方法为 5~10 倍),有利于保护风机和易损组件,节能可达 70%。

(3) 配置功率因数  $\cos \phi$  转换组件,在炉子保温阶段,使  $\cos \phi$  由 0.5 提高到 0.83。降低了保温时的无功损耗,节能可达 40%。

(4) 在保证工作室尺寸的同时,压缩炉子容积,节省冷却气体 20%,并具有更大的装载能力,处理同量工件省时 30%。

(5) 炉室隔热层表面覆盖 CFC 碳纤维保护层,有效保护了石墨毡隔热层,延长维护周期,提高了炉室使用寿命。

10) 汽车行业已成功应用真空渗碳、高压气(油)淬等高新技术 这些技术不但解决了齿轮气体渗碳的晶界内氧化(2~10  $\mu\text{m}$ )质量问题。而且渗层控制精度高、渗层均匀、畸变小、表面光洁、效率高、灵活性好,对于盲孔、深孔零件特别适用,而且可布置在流水生产线上。

11) 开发应用燃气真空热处理炉 欧、美、日等研发出燃气真空炉的设备和技术是以天然气作为能源,并在涵盖电热真空炉所有优点基础上,着眼于提高炉子的热效率(可达 80%)和生产效率,节能环保并降低了生产成本。目前已有 200 余台燃气真空炉用于生产。我国在几年前开始进行燃气真空炉的研制开发,并在钢铁行业的热镀锌板退火炉生产线上首次应用。

## 五、真空热处理工艺

### (一) 真空退火

真空退火可使金属材料获得洁净光亮的表面,省去或减少后加工工序,使金属材料软化,达到消除内应力、改善晶体结构、除气、提高材料的性能等目的。真空退火操作过程是首先加热到所需要温度,在此温度下保温一定时间,随后按预定速度冷却。真空退火主要应用于活性与难熔金属的退火及除气,电工钢、电磁合金、不锈钢及耐热合金退火,铜及其合金以及钢铁材料的退火等。

#### 1. 钛及钛合金的真空退火

钛及其合金在高温下与氢、氧和氮等气体的亲和力极大。因此,如果在含有这类气体的气氛中加热,会由于吸收氢而产生氢脆,吸收氧和氮气而产生硬化现象。经真空退火的钛及钛合金不仅可获得光亮的表面,而且还可提高脱气效果,表 2-26 为钛及其合金的退火加热规范。

表 2-26 各种钛合金的相变温度及推荐的退火温度

材料 牌号	$\alpha + \beta \rightarrow \beta$ 转变温度(°C)	再结晶 温度(°C)	消除应力退火 温度(°C)	再结晶退火温度(°C)		真空度 (Pa)	冷 却
				板 材	棒材及锻件		
TA1	800~920	580~700	445~485	520~650	670~690	10 <sup>-2</sup> ~ 10 <sup>-4</sup>	以小于 28°C/h的速度冷至 425°C下
TA2	800~920	580~700	445~485	520~540	670~690		
TA3		580~700	445~485	520~540	670~690		
TA6	1 000~1 020	750~850	550~650	520~540	750~800		
TA7	1 000~1 025	750~900		700~750			
TA8	950~980	750~900	550~650	700~750	750~800		
TC1	910~950	720~840	550~650	640~660	740~760		
TC2	920~960	760~860	520~560	660~680	750~760		
TC3	950~990	700~850	545~585	750~800	750~800		
TC4	980~1 010	750~850	600~650	750~800	750~800 704(2小时)		
TC6	960~1 000	780~900	600~650		600~650 870~920		
TC8	1 000~1 020		530~620		600 或 930+530		
TC9	1 000~1 020		550~650		600 或 930+530		
TC10	~935		550~650		760		
TB1	750~800	500~770	480~650		800		
TB2	750		480~650		800		

2. 铜和铜合金的真空退火

铜合金中含有蒸汽压比较高的 Pb、Zn、Sn、Al 等合金元素,在选择真空度时,应在保证光亮度前提下,尽可能选择低的真空度,以防止合金元素的挥发。表 2-27~表 2-29 为铜合金真空热处理的工艺参数。

表 2-27 青铜真空热处理参数

材 料 号	真空度(Pa)	退火温度(°C)	冷却方式
QSn4-3、QSn4-4-2.5	13.3~1.33	600	炉 冷
QSn6.5-0.4、QSn4-0.3		600~650	
QA19-2	13.3~1.33	600~750	
QA19-4		700~750	
QA110-3-1.5、QA110-4-4		650~750	
QA110-5		600~700	
QA110-7		650~750	

表 2-28 紫铜和黄铜真空热处理参数

材料牌号		消除应力退火温度(°C)	再结晶退火温度(°C)	真空度(Pa)	冷却方式
紫铜: T1、T2、T3、T4			600~700	133~13.3	炉冷或 惰性气体冷
黄铜	H96		540~600	13.3~1.33	
	H90	200	650~720		
	H80	260	600~700		
	H70、H68	260~270	520~650		
	H62	270~300	600~700		
	H59		600~670		
特殊 黄铜	HSn70-1	300~350	560~580	133~13.3	
	HSn62-1	350~370	550~650		
	HAl77-2	300~350	600~650		
	HMn58-2、HFe59-1-1		600~650	13.3~1.33	
	HPb61-1 HPb63-3		600~650 620~650		

表 2-29 铍青铜时效工艺参数

材 料	时效温度(°C)	真空度(Pa)	时间(小时)
QBe2	300	1~10 <sup>-2</sup>	3~5
QBe2.5	285		3~4
		320	2

### 3. 磁性材料真空退火

(1) 电工纯铁的真空退火。电工纯铁,退火的目的是消除应力、减少材料的杂质、使晶粒长大、磁阻减少、磁通增加、磁导率增高和矫顽力下降。电工钢的退火工艺曲线见图 2-22。

对含 Al 的电工纯铁,退火温度不宜超过 900°C,否则表面生成氧化铝反而会使磁性能下降。退火加热速度要求在 540°C 以上缓慢加热。为减少机械加工产生的应力对磁性能的影响,电工钢零件都是加工成形后才退火,为保证已加工好零件的质量,真空度可适当提高,一般为 1~10<sup>-3</sup> Pa。

(2) 硅钢片的真空退火。硅钢片的热处理目的在于消除热轧、冷轧及冷加工所造成硅钢片晶粒破碎、晶格畸变而产生的内应力,使细小而均匀的组织通过再结晶变为晶粒粗大而均匀的组织。真空退火可以使氧化物还原、减少碳对磁性能的影响,从而使磁导率增高、磁滞损耗下降、电阻系数升高、涡流损耗下降。真空度在 10<sup>-1</sup>~10<sup>-2</sup> Pa 时可去除硅钢片中的气体 H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和氮化物、氧化物、碳化物,减少杂质对磁性能的影响,消除应力和晶界畸变。硅钢片典型的真空热处理工艺见图 2-23。

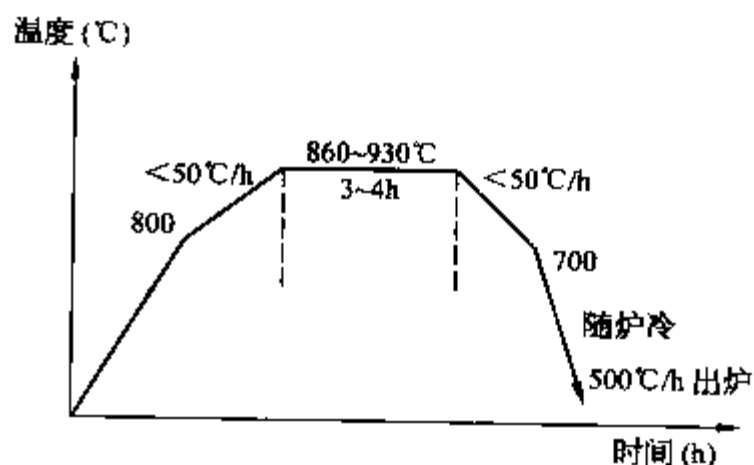


图 2-22 电工钢真空退火工艺曲线



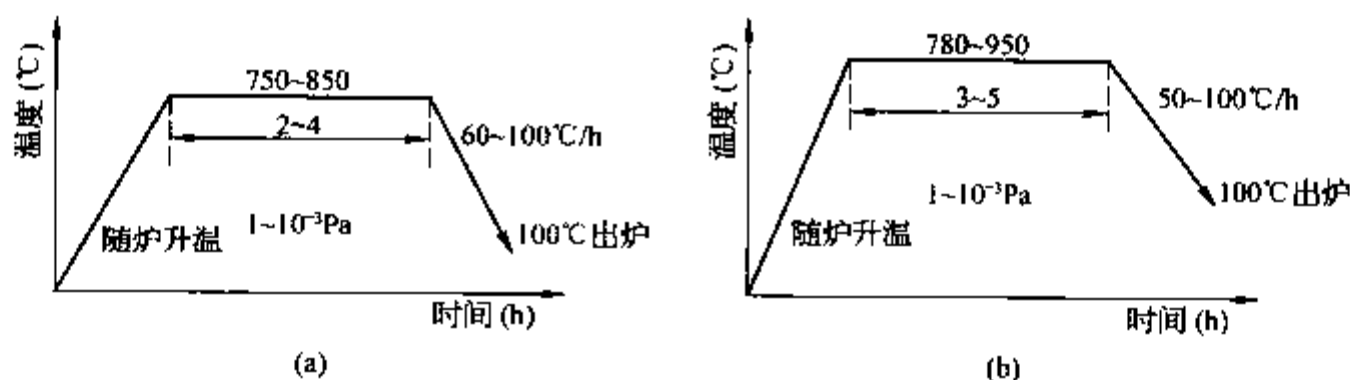


图 2-23 硅钢片真空退火工艺曲线

(a) 热轧硅钢片; (b) 冷轧硅钢片

## 4. 钢铁材料的真空退火

一般结构钢在  $1 \sim 10^{-1}$  Pa 下退火,即可达到 60% 的光亮度。一些钢种的真空退火工艺参数见表 2-30。某些不锈钢的退火工艺见表 2-31。

表 2-30 钢的真空退火工艺参数

材 料	真空度(Pa)	退火温度(°C)	冷却方式
45	$1.3 \sim 1.3 \times 10^{-1}$	850~870	炉冷或气冷, $\approx 300^\circ\text{C}$ 出炉
$\alpha: 0.35\% \sim 0.6\%$ 卷钢丝	$1.3 \times 10^{-1}$	750~800	炉冷或气冷, $200^\circ\text{C}$ 出炉
40Cr	$1.3 \times 10^{-1}$	890~910	缓冷, $\approx 300^\circ\text{C}$ 出炉
Cr12MoV	$> 1.3 \times 10^{-1}$	850~870	$720 \sim 750^\circ\text{C}$ , 等温 4~5 h 炉冷
W18Cr4V	$1.3 \times 10^{-1}$	870~890	$720 \sim 750^\circ\text{C}$ , 等温 4~5 h 炉冷
空冷低合金模具钢	1.3	780~870	缓 冷
高碳高铬冷作模具钢	1.3	870~900	缓 冷
W9-18 热作模具钢	1.3	815~900	缓 冷

表 2-31 某些不锈钢的退火工艺参数

钢 种 类 型	主要化学成分(质量分数,%)分析结果	退火温度范围(°C)	真空度(Pa)
铁素体类	Cr12~14, C 0.08	630~830	$1.3 \sim 1.3 \times 10^{-1}$
马氏体类	Cr14, C 0.4; Cr16~18, C 0.9	830~900	$1.3 \sim 1.3 \times 10^{-1}$
奥氏体类(未稳定化)	Cr18, Ni8	1 010~1 120	$1.3 \sim 1.3 \times 10^{-1}$
奥氏体类(稳定化)	Cr18, Ni8, Nb 或 Ti	950~1 120	$1.3 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-3}$

## (二) 真空淬火、真空回火

## 1. 真空淬火

真空淬火是真空状态下加热,然后在冷却介质中进行快速冷却使钢硬化。工艺操作过程见图 2-24。图中实线为温度变化,虚线为真空度变化。工件入炉后首先抽真空,当真空度达到  $(6 \sim 1) \times 10^{-2}$  Pa 时开始加热,在加热过程中通常要经过预热,使工件的温度和炉温趋于一致,并使工件的本身受热均匀,当保温结束后,炉内回充惰性气体至  $0.8 \times 10^5$  Pa,然后工件入油淬火,或快速充气至  $0.5 \sim 1$  MPa 进行高压气淬。表 2-32 给出多种钢材的淬火方法和所需要的真空度,供选用时参考。

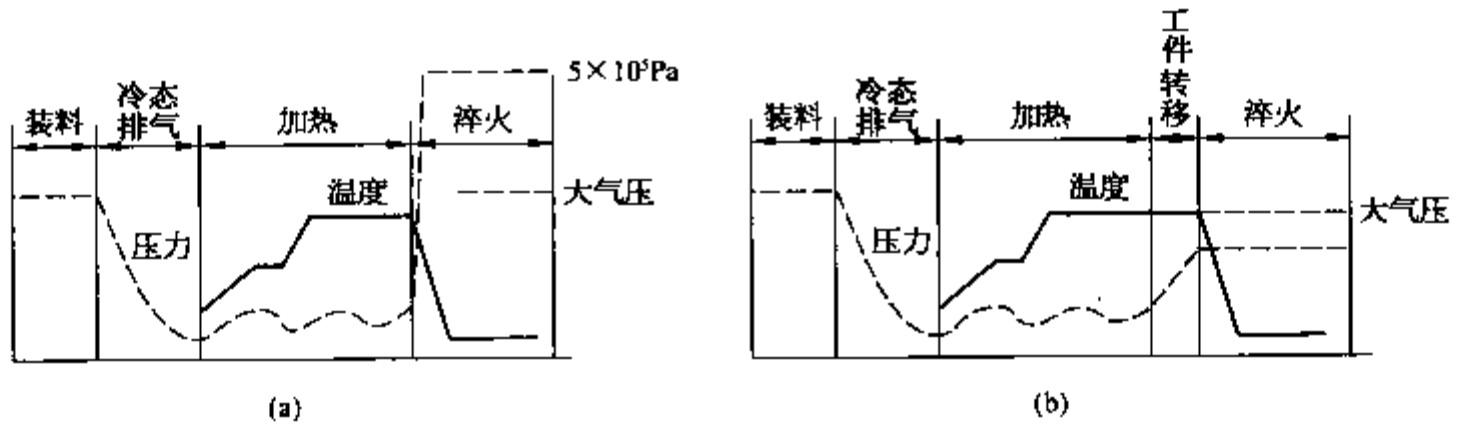


图 2-24 真空淬火工艺过程示意图

(a) 真空气淬; (b) 真空油淬

表 2-32 各种钢和合金加热时的真空度要求和淬火冷却方法

材 料	真 空 度			淬 火 方 法		
	低	中	高	油	水	气
油冷淬火钢: 9Mn2V, CrWMn, WCrV, 40CrMnMo, 40CrNiMo, 9CrWMn, GCr15, 5CrNiMo, 5CrMnMo, 60Si2MnA, 65Mn, 50CrVA, T10, T12		A		A		
气冷淬火钢: H13 (4Cr5MoSiV1), 3Cr2W8V, Cr12, Cr6WV, Cr12MoV, 7CrSiMnMoV, LD, 4Cr5W2SiV, 38Cr5MoVSi		A		C		A
高速钢系列: W18Cr4V, W9Mo3Cr4V, W6Mo5Cr4V2, W6Mo5Cr4V2Al, W6Mo5Cr4V3Al, W12Cr4V4Mo, W12Mo3Cr4V3Co5Si, W7Mo4Cr4Co5, W2Mo9Cr4V2Co8, W6Mo6Cr4V5SiNbAl	B	A				A
钛合金: Ti-2Al-4Mn, Ti-6Al-4V, Ti-679, Ti-6Al-4V(低O <sub>2</sub> ), Ti-6Al-6VZ-5Sn-1(Fe, Cu), Ti-7Al-4Mo			A			
不锈钢: 12Cr13, 20Cr13, 30Cr13, 68Cr17, 14Cr17Ni2, 90Cr18MoV, 102Cr17Mo		A				A
沉淀硬化合金: Ni-Spanc, AM-350, AM-355, 07Cr17Ni7Al, 05Cr17Ni4Cu4Nb			A			A
高温合金: GH37, GH134, GH49, GH151, GH141, GH130			A			A

注: 1. 真空度: 低——机械泵, 中——机械泵+增压泵, 高——机械泵+增压泵+扩散泵;

2. 淬火方法: 油——真空油淬, 水——真空水淬, 气——0.2~1 MPa 真空气淬;

3. A——必要条件, B——分压处理, C——为缩短淬火时间, 冷却到 550℃ 油淬, D——气冷到 1090℃ 油淬。

## 2. 真空回火

1) 概述 真空回火是将工件均匀摆放在回火炉中, 抽真空至  $1.3 \text{ Pa}$  后再回充高纯氮气至  $5 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 在风扇驱动的气流中将工件加热至预定温度, 经充分保温后进行强制风冷。真空回火的工艺曲线如图 2-25。

真空淬火件原则上应进行真空回火。实践证明, 高速钢真空淬火及三次真空回火后, 静弯曲功(破断载荷与形变量乘积)明显提高了。同时由于真空回火的去氢作用, 其塑性也明显提高了。



对批量很大、高温回火后还需进行磨削加工的高速钢和其他材料模具可采用普通炉回火,对质量并无明显影响,这样可节约大量的高纯氮,使生产成本降低。对只进行低温回火的产品,真空回火与常规工艺回火在质量上并无多大差别。从经济角度考虑应采用普通回火。

在没有真空回火炉、产品批量不大时,也可以用真空淬火炉回火。在工模具进行二、三次回火时,有时可与 $560\sim 570^{\circ}\text{C}$ 氮碳共渗、离子渗氮操作结合起来进行,使表面形成数微米的氮化合物层及一定厚度的扩散层。这样不仅可使热作模具钢的模腔表面相当光滑,而且表面具有高的抗蚀能力、高的硬度和高的耐磨性。铝挤出模在真空淬火后进行氮碳共渗回火后,可比常规淬火及盐浴渗氮的寿命高三倍。

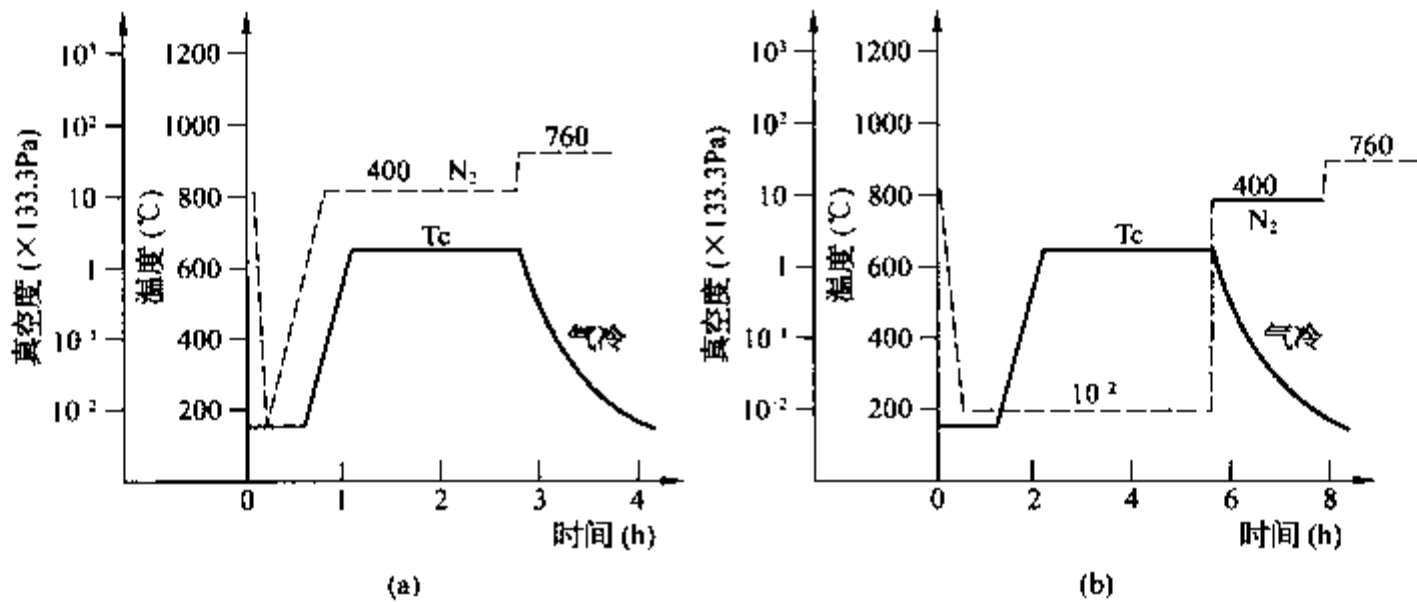


图 2-25 真空回火的两种工艺

(a) 充氮真空回火; (b) 1.033 Pa 真空回火

2) 真空回火的光亮度 真空淬火后良好的光亮颜色在真空回火后有时会变成灰色或暗灰色,其原因是真空回火在低于 $650^{\circ}\text{C}$ 的区域内进行,而在低于 $650^{\circ}\text{C}$ 温度范围内真空炉呈微氧化气氛(或微氧化状态),即使真空度达 $10^{-4}$  Pa时,炉内氧量近于消失,但水蒸气还保持着相当比例。

提高真空回火工件光亮度的方法有以下几种:

- (1) 提高工作真空度,由以前真空回火通常采用的 $1\sim 10$  Pa提高到 $1.3\times 10^{-2}$  Pa。这样可以减少残氧量,消除氧对工件氧化的影响。
- (2) 充氮气中加入10%氢气,使循环加热和冷却气流的混合气呈还原性气氛,炉内的氧化性气氛与氢气作用,形成弱还原性气氛。

(3) 减少真空炉隔热屏吸收和释放水气的影响。真空回火炉采用全金属隔热屏设计,排除耐火纤维隔热屏吸气、吸水性大的弊端。

(4) 回火后快速冷却,使工件出炉温度低,从而提高回火光亮度。

(5) 提高温度均匀性。温度均匀性好,有利于回火光亮度一致。

采用上述方法后,真空回火后工件的表面光亮度可达到真空淬火后的90%以上。

3) 真空回火脆性 钢在淬火后需进行真空回火的目的主要是调整性能、组织,消除应力,降低脆性,提高韧性,使表面保持一定的光亮度。

真空回火同样遵循普通回火的规律,即存在第一类及第二类回火脆性。因此应避免在第一类回火脆性区回火。防止第二类回火脆性的主要措施是在回火加热保温后进行快速冷却。因此真空回火炉设计时一定要考虑有快速冷却的强冷装置,以抑制某些钢的第二类回火脆性的产生。

4) 氢脆 对某些零件要进行电镀、磷化或酸洗时,必须考虑零件会产生氢脆这个问题,常可以通过在真空中加热进行去氢处理来消除氢脆。

### 3. 常用金属材料的真空淬火、回火工艺规范

1) 合金结构钢和超高强度钢 常用合金结构钢和超高强度钢的真空热处理工艺参数见表2-33、表2-34。

合金结构钢和超高强度钢在真空热处理时应注意下列几个问题:

(1) 合金结构钢和超高强度钢在真空淬火加热时,由于真空的脱气和净化作用,去除了阻碍晶粒长大的氧化物、氢化物、氮化物等杂质。与普通电炉、盐炉热处理相比,虽然淬火加热的温度相同,但晶粒度稍大。因此,对晶粒长大倾向比较敏感的材料,在进行真空热处理时,可采用规定温度的下限或比规定温度低  $5\sim 10^{\circ}\text{C}$  为宜。

(2) 淬火加热时真空度的选择应从零件表面光亮度要求和合金元素挥发等方面考虑。首先考虑防止 Cr、Mn 元素的挥发。特别是 Mn 合金结构钢,在真空度为  $1.3\text{ Pa}$  甚至  $13.3\text{ Pa}$  下进行加热都能引起 Mn 的挥发。因此,40Mn2、35SiMn、42Mn2V 钢进行真空热处理时,可向炉内回充高纯氮使真空度控制在  $13.3\text{ Pa}$ 。其他合金结构钢真空度在  $1.3\text{ Pa}$  甚至  $13.3\text{ Pa}$  的情况下,也可获得光亮的表面。

(3) 合金结构钢、超高强度钢真空淬火主要是在油中进行。只是当材料的淬透性很好、零件有效厚度较小时,可采用真空气体淬火。为了提高一些超高强度钢的综合力学性能,特别是断裂韧性,减少淬火畸变,也可进行真空等温淬火。但等温淬火主要针对截面不大的重要零件,如 30CrMnSiA、30CrMnSiNi2A、32SiMnMoV、40SiMnCrMo 等钢制造的螺栓、接头等零件。

(4) 合金结构钢的回火温度范围一般在  $200\sim 650^{\circ}\text{C}$  之间,需考虑表面光亮度及回火脆性的影响。对于在  $250^{\circ}\text{C}$  以下的回火,采用普通空气循环电炉或油炉,基本上可保持真空淬火后的表面光亮度。对在第二类回火脆性区回火的含 Ni、Mn、Cr、Si 元素的钢材,回火后应采取强制快冷方法避免回火脆性。

表 2-33 常用合金结构钢真空热处理工艺规范

钢材牌号	淬 火			回 火		
	温度( $^{\circ}\text{C}$ )	真空度(Pa)	冷 却	温度( $^{\circ}\text{C}$ )	真空度(Pa)	冷 却
45Mn2	840	1.3	油	550	$5.3\times 10^4\sim 7.3\times 10^4$ ①	油空冷,氮气快冷
30SiMn2MoV	870	1.3		650	1.3~0.13	氮气快冷
30Mn2MoTiB	870	1.3		200	空气炉	空 冷
40CrMn	840	1.3		520	$5.3\times 10^4\sim 7.3\times 10^4\text{ N}_2$	快 冷
30CrMnSiA	880	1.3		520	$10^{-1}$ 或 $5.3\times 10^4$	
50CrV	860	1.3~0.13		500		
35CrMo	850	1.3~0.13		550		
40CrMnMo	850	1.3		600		
25Cr2MoV	1040	1.3~0.13		700	0.13	
25Cr2MoV	900	1.3~0.13		620	0.13	
38CrMoAl	940	1.3		640	0.13	
40Cr	850	1.3~0.13		500	氮气: $5.3\times 10^4$	氮气、氧气强制冷却
40CrNi	820	1.3~0.13		500	氮气: $5.3\times 10^4$	氮气强制冷却
37CrNi3	820	1.3~0.13		500	0.13, 氮气: $5.3\times 10^4$	
40CrNiMo	850	1.3~0.13	600			
30CrNi2MoV	860	1.3~0.13	650			
45CrNiMoV	850	1.3~0.13	460	氮气: $5.3\times 10^4$	空冷	
18Cr2Ni4W	950	1.3	200	—		
25CrNi4W	850	1.3~0.13	550	氮气: $5.3\times 10^4$		
30CrNi3	820	1.3~0.13	氮气,油	500	—	氮气强制冷却

注: ① 先抽高真空,再充分压保护。

表 2-34 超高强度钢真空热处理工艺规范

钢材牌号	淬 火			回 火		
	温度(°C)	真空度(Pa)	冷 却	温度(°C)	时间(h)	冷 却
30CrMnSiNi2A	900	1.3~0.13	油或(260±20)°C等温	250	1	空 冷
32SiMnMoV	920	1.3	油或(280±20)°C等温	320	2	空冷或氮气强制冷却
40SiMnMoV(RE)	930	1.3	油或 230°C等温	250	3	空 冷
40SiMnMoCrMoV(RE)	930	1.3	油	280	2	空冷或氮气强制冷却
40SiMnCrNiMoV	900	1.3	油或(310±10)°C等温	230~280	2	空冷或氮气
40CrNiMo	850	1.3~0.13	油	200	2	空 冷
45CrNiMoV	860	1.3	油	300	1	空冷或氮气强制冷却

2) 弹簧钢 弹簧经真空热处理能避免氧化、脱碳等缺陷,加上真空除气作用提高了韧性,能显著改善弹簧的疲劳寿命和可靠性。表 2-35 为常用弹簧钢的真空热处理工艺规范。

表 2-35 常用弹簧钢真空热处理工艺规范

钢 号	淬 火		回 火		硬度 HRC
	温度(°C)	真空度(Pa)	温度(°C)	真空度(Pa)	
65Mn	预热 500~550 加热 810~830	1.3~0.13 13~1.3	370~400	先抽真空至 1.3 Pa 升至回火温 度,回充氮气至 $5 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ Pa	36~40
60Si2MnA	预热 500~550 加热 860~880	1.3~0.13 13~1.3	410~460		45~50
60Si2CrVA	预热 500~550 加热 850~870	0.13 1.3	430~480		45~52
50CrVA	预热 500~550 加热 850~870	0.13 1.3~0.13	370~420		45~50

弹簧钢的成分中有蒸汽压较高的 Mn、Cr 等。因此, Mn 系、Si-Mn 系弹簧钢真空热处理时,淬火加热时的真空度不宜高于 1.3 Pa。含 Cr 的弹簧钢淬火加热的真空度不宜高于 0.13 Pa。65Mn、60SiMnA 及 60Si2CrVA 钢具有回火脆性,所以真空回火后一定要在惰性气体中强制循环冷却。

3) 轴承钢 进行真空热处理的高碳高铬轴承钢主要是要求精度高、热处理畸变小、硬度均匀和热处理后难以进行精加工的微型轴承和高精度轴承以及液压元件中的叶片定子、柱塞泵中的柱塞以及其他精密零件、工模具等。真空热处理可以使轴承耐磨性和接触疲劳寿命提高两倍以上,可以使液压偶件、精密零件、工模具不致氧化、脱碳和腐蚀,并减少热处理后的畸变以达到精度要求。表 2-36 为常用轴承钢的真空热处理工艺规范。对于尺寸稳定性有严格要求的轴承或零件以及在低温下工作的轴承,真空淬火后紧接着应进行冷处理或深冷处理,时间 1~2 h。

表 2-36 常用轴承钢的真空热处理工艺规范

钢 号	预 热		淬 火			回 火			硬度 HRC
	加热温度(°C)	真空度(Pa)	加热温度(°C)	真空度(Pa)	冷却介质	加热温度(°C)	时间(h)	介质	
GCr15	520~580	$10^{-1}$	830~850	$1 \sim 10^{-1}$	油	150~160	2~3	油	≥60
GCr15SiMn	520~580	$1 \sim 10^{-1}$	820~840	1~10	油	150~160	2~3	油	≥60
GSiMnV(RE)	500~550	$1 \sim 10^{-1}$	780~810	1~10	油	150~170	2~3	油	≥62
GCrSiMnMoV(RE)	500~550	$1 \sim 10^{-1}$	770~810	1~10	油	150~170	2~3	油	≥64

4) 合金工具钢 常用合金工具钢中所含的合金元素主要有 Cr、W、Mn、Mo、V 及 Si、Ni 等,其中 Cr、Mn 蒸汽压较高,元素易挥发,通常在  $1.3 \sim 0.13$  Pa 真空度下进行加热,可避免合金元素的挥发。由于合金工具钢的导热性远比普通碳素钢要差,特别是高合金工具钢或大截面的工具,为减少加热时模具内外温差而产生的热应力,一般都应增加预热。表 2-37 为常用合金工具钢的真空热处理工艺参数。除 Cr12、Cr12MoV、4Cr5MoSiV1 (H13)、7CrSiMnMoV、5CrNiMo、5CrMnMo、3Cr2W8V 等在工具截面不太厚的情况下,可以采用真空气淬外,其他一些合金工具钢则主要采用真空油淬火。

表 2-37 常用合金工具钢真空热处理工艺规范

钢号	预 热			淬 火			回 火			硬度 HRC
	一次预热温度(°C)	二次预热温度(°C)	真空度(Pa)	加热温度(°C)	真空度(Pa)	冷却介质	加热温度(°C)	真空度(Pa)	冷却介质	
9CrSi	500~600		$1 \sim 10^{-1}$	850~870	$1 \sim 10^{-1}$	油	170~190	空气炉	空气	61~63
CrWMn	500~600		$1 \sim 10^{-1}$	820~840	$1 \sim 10^{-1}$	油	170~185	空气炉	空气	62~63
CrMn	500~600		$1 \sim 10^{-1}$	840~860	$1 \sim 10^{-1}$	油	170~190	空气炉	空气	60~63
9Mn2V	500~600		$1 \sim 10^{-1}$	780~820	$1 \sim 10^{-1}$	油	170~190	空气炉	空气	58~62
5CrMnMo	500~600		$1 \sim 10^{-1}$	830~850	$1 \sim 10^{-1}$	油或氮气	450~500	$5 \sim 7 \times 10^4$	氮气	38~44
5CrNiMo	500~600		$1 \sim 10^{-1}$	840~850	$1 \sim 10^{-1}$	油或氮气	450~500	$5 \sim 7 \times 10^4$	氮气	39~44.5
Cr12MoV	500~550	800~850	$1 \sim 10^{-1}$	1020~1040	$1 \sim 10^{-1}$	油或氮气	170~250	空气炉	空气	58~62
Cr6WV	500~550	750~820	$1 \sim 10^{-1}$	970~1000	10	油或氮气	170~250	空气炉	空气	58~62
3Cr2W8V	480~520	800~850	$1 \sim 10^{-1}$	1050~1100	$1 \sim 10$	油或氮气	560~580	$5 \sim 6.7 \times 10^4$	氮气	42~47
4Cr5W2SiV	480~520	800~850	$1 \sim 10^{-1}$	1050~1100	$1 \sim 10$	油或氮气	600~650	$5 \sim 6 \times 10^4$	氮气	38~44 48~32
7CrSiMnMoV	500~600		$10^{-1}$	880~900	$10^{-1}$	油或氮气	450 200	$5 \sim 6.7 \times 10^4$	氮气 空气	52~54 60~62
4Cr5MoSiV1	500~550	800~820	$10^{-1}$	1020~1050	$10^{-1}$	油或氮气	560~600	$5 \sim 6.7 \times 10^4$	氮气	45~50
Cr12	500~550	800~850	$1 \sim 10^{-1}$	960~980	$10^{-1}$	油或氮气	180~240	空气炉	空气	60~64

5) 高速钢 常用高速钢真空热处理工艺规范见表 2-38。

表 2-38 高速钢真空热处理工艺规范

钢号	预 热			淬 火			回 火			硬度 HRC
	一段预热温度(°C)	二段预热温度(°C)	真空度(Pa)	加热温度(°C)	真空度(Pa)	冷却介质	加热温度(°C)	真空度(Pa)	冷却介质	
W18Cr4V	600~650	850±10	$1 \sim 10^{-1}$	1260~1275	10~266 Pa (回充高纯氮气)	(3~5)×10 <sup>5</sup> Pa 的氮气快冷	540~560	$6.7 \times 10^4 \sim 2 \times 10^5$	氮气快冷	63~66
95W18Cr4V				1250~1270			540~560			63~66
W6Mo5Cr4V2				1200~1225			540~560			63~66
W6Mo5Cr4V2Al				1200~1225			540~560			65~68
W6Mo5Cr4V3Al				1200~1225			540~560			65~68
W12Cr4V4Mo				1220~1235			550~560			64~67
W12Mo3Cr4V3Co5Si				1210~1230			540~580			65~68
W7Mo4Cr4Co5				1180~1200			540~560			65~68
W2Mo9Cr4V2Co8				1180~1200			540~560			65~68
W6Mo5Cr4V5SiNbAl				1200~1230			540~560			65~68

高速钢真空淬火时应注意以下问题:

(1) 高速钢(通常含有 4% Cr)的淬火温度一般在 1 200℃以上。为避免 Cr、Mn、Al 等合金元素的挥发,在第二段预热后就应回充氮气分压,使保持在 10~200 Pa 分压下进行加热。

(2) 高速钢导热性差,为减少加热应力,应进行二段预热。对大件或复杂刀具可以在 1 000℃进行第三段预热。含钴高速钢属超硬高速钢,为使碳化物能充分和均匀地溶解于奥氏体,达到理想的热硬性,可适当延长加热保温时间。

(3) 高速钢刀具真空热处理时,淬火温度应比盐浴热处理降低 10~20℃为宜,以防止晶粒粗化。对一些冲头、冲模等冷冲压模具,可采用较低温度淬火以获得较好的韧性和耐磨性,提高使用寿命。

(4) 经真空淬火的高速钢需在 540~560℃温度范围内进行三次回火,其目的是使残留奥氏体进一步转变为马氏体,使碳化物弥散析出,并可消除淬火时的应力,提高硬度、韧性和耐磨性。为使高速钢回火时保持较好的光亮度,应采用能达到高真空的带扩散泵的真空机组,特殊情况下可向炉内填充含 5% 氢的氮氢混合气体。

(5) 对大型复杂高速钢刀具(如滚刀、插齿刀)或材质较差(碳化物级别较高)的刀具,可采用真空气淬加分级等温冷却工艺。

6) 不锈钢耐热钢 表 2-39 为常用不锈钢耐热钢的真空热处理工艺规范。

不锈钢耐热钢真空热处理时应注意以下问题:

(1) 在热处理温度相同时,真空淬火的马氏体不锈钢的晶粒度比普通电炉加热淬火的晶粒度大一级,这与真空加热时的除气作用除去了钢中阻止晶粒长大的气体杂质和气体化合物有关,对材料冲击韧度并无显著影响。

(2) 双相不锈钢,如 12Cr21Ni5Ti,在热处理时冷却速度不能太慢,因为在 700~800℃缓慢冷却会析出 $\sigma$ 脆性相,在 500~650℃缓冷有金属间化合物析出和产生所谓的 475℃脆性,从而使材料变脆而不能使用。如材料中铝和钛含量偏高更是如此。铁素体不锈钢对 475℃脆性极为敏感,因此,真空热处理的冷却速度很重要。

(3) 马氏体不锈钢通常在油中淬火,也可以在高压气淬炉中淬火。

(4) 奥氏体镍铬钢在真空中加热,如用氮气作分压和冷却,会发现 $Cr_2N$ 在钢表面析出,微量渗氮会使力学性能变坏,即 $R_m$ 增高、 $Z$ 下降。所以用高纯氩来进行分压和冷却为好。

(5) 在制定不锈钢零件真空热处理规范时,对没有畸变要求、壁厚较薄的零件可以不预热,对厚度较厚、尺寸较大、要求热处理畸变小零件,建议采用一段或两段预热。一段预热温度为 800~850℃,两段预热温度为 450~550℃、800~850℃。

表 2-39 常用不锈钢耐热钢的真空热处理工艺规范

钢号	淬 火			回 火			硬度 HRC
	加热温度 (℃)	真空度 (Pa)	冷却介质	加热温度 (℃)	真空度 (Pa)	冷却介质	
20Cr13, 30Cr13	1 040~1 060	1	油或 (2~5)× 10 <sup>5</sup> Pa 氮气	230±30	空气炉	空气	40~45
				250±30	空气炉		36~40
				500±20	(5~8)×10 <sup>4</sup>	氮气	32~36
40Cr13	1 050~1 100	1	油或 (2~5)× 10 <sup>5</sup> Pa 氮气	250±30	空气炉	空气	40~50
95Cr18	1 010~1 050	<1		200±20			50~60
14Cr17Ni2	950~1 040	1	油	250±30			
14Cr17Ni2	950~1 040	1	油	500±20	0.1	氮气	45~50
12Cr18Ni9	1 100~1 150	1.3~0.13	氮气或氩气	—	—	—	—
13Cr11Ni12W2MoV	1 000~1 020	1.3~0.13	氮气或油	660~710	0.13 1.3~0.13	氮气	304~307HB
				540~600			301~345HB

(续表)

钢 号	淬 火			回 火			硬度 HRC
	加热温度 (°C)	真空度 (Pa)	冷却 介质	加热温度 (°C)	真空度 (Pa)	冷却 介质	
13Cr14Ni3W2VB	1 050±10	1.3~0.13	氮气或油	660~680	1.3~0.13	氮气	303~306HB
				550~600			301~335HB
05Cr17Ni4Cu4Nb	1 030~1 050	1.3	氮气或油	时效	(5~8)×10 <sup>4</sup>	惰性 气体	>40
				480			或氩气
07Cr17Ni7Al (17-7PH)	固溶 1 050±10 再调整 760±10	1.3~0.13	氩 气	550	高纯氩气 (5~8)×10 <sup>4</sup>	氩气	>35
				580			或 0.1
07Cr15Ni7Mo2Al (PH15-7Mo)	固溶 1 050±10 再调整 950±10 再-73 冰冷处理	1.3	氩 气	时效	(5~8)×10 <sup>4</sup>	氩气	≥363HB
				510±10			或 0.1

7) 高温合金 高温合金又称热强合金或超级合金。高温合金应具有较高的持久强度,同时要求高温蠕变强度、耐热疲劳、机械疲劳、抗氧化、冲击韧度,缺口敏感性以及工艺性等方面有良好的性能。

高温合金的真空热处理特点:

(1) 铁基或镍基高温合金都含有一定量的 Al、Mn、Ti 元素以及含较高的 Cr,这些元素的蒸汽压比较高,为防止元素挥发需要合理地选择真空度。一般固溶时先抽至极限真空(通常  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  Pa),然后在高温加热时通入高纯氩气,使真空度降至  $1 \sim 0.1$  Pa。对已加工成成品尺寸再进行时效处理的零件,为保持原来的表面光亮度 and 尺寸精度,一般采用较高的真空度( $10^{-2} \sim 10^{-3}$  Pa)。

(2) 热处理周期长,特别是固溶加时效的合金,时效时间往往 16 h 以上。要求真空炉的泄漏非常小,其压升率最好控制在  $0.133$  Pa/h,至少不应大于  $1.33$  Pa/h。否则,在长时间时效时会因空气渗入而使零件不断被氧化。

(3) 高温合金的固溶处理要求有较快的冷却速度,一般要求水冷,这就需要真空水淬炉。大部分合金的固溶可以在带有热交换器并能强制循环冷却的高压气淬炉内进行。为防止氮对高温合金的渗氮作用,一般采用高纯(99.99%)氩气作为冷却和分压的气体。常用高温合金的真空热处理工艺规范见表 2-40。

表 2-40 常用高温合金真空热处理工艺规范

合金 牌号	固 溶 处 理				时 效 处 理				
	固溶温度 (°C)	固溶时间 (h)	冷却	真空度 (Pa)	时效温度 (°C)	时效时间 (h)	冷却	真空度 (Pa)	硬度 HB
GH4037	1 180±10	2	气冷	1~0.1	800±10	16	气冷	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	3.3~3.7
	1 050±10	4							
GH4043	1 150±10	4	气冷	$1 \sim 10^{-1}$	700±10	16	气冷	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	3.1~3.5
	1 065±10	16							
GH4049	1 200±10	2	气冷	$1 \sim 10^{-1}$	850±10	8	气冷	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	3.2~3.5
	1 050±10	4							
GH151	1 250±10	5	气冷	$1 \sim 10^{-1}$	950±10	10	气冷	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	3.1~3.4
	1 000±10	5							
GH141	1 180±10	0.5	气冷	$1 \sim 10^{-1}$	900±10	4	气冷	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	
GH2130	1 180±10	1.5~4	气冷	$1 \sim 10^{-1}$	800±10	16	气冷	$10^{-1} \sim 10^{-2}$	3.3~3.7
	1 050±10	4							

(续表)

合金牌号	固溶处理				时效处理				
	固溶温度(°C)	固溶时间(h)	冷却	真空度(Pa)	时效温度(°C)	时效时间(h)	冷却	真空度(Pa)	硬度HB
GH2302	1 180±10	2	气冷	1~10 <sup>-1</sup>	800±10	16	气冷	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-2</sup>	3.3~3.7
	1 050±10	4							
GH1131	1 130~1 200	1.5~2	气冷	1~10 <sup>-2</sup>					
	1 160±10								
GH2132	980~1 000	0.5~2	气冷	10 <sup>-1</sup>	710±10	12~16	气冷	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>	3.4~3.8
GH2135	1 080±10	8	气冷	1~10 <sup>-1</sup>	830±10	8	气冷	10 <sup>-1</sup> ~10 <sup>-2</sup>	3.45~3.65
	1 140	4			700±10	16			
GH39	1 050~1 080		气冷	10 <sup>-1</sup> ~	830±10	8	气冷	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>	3.4~3.8
				10 <sup>-2</sup>	650±10	10			

8) 钛合金真空淬火(固溶)和时效 钛合金的淬火速度要求很快,零件从加热室到淬火水槽的转移时间应在 10 s 以内。否则淬火后的强度会降低。

钛合金的时效温度大多在 450~600°C 之间,可以在炉子抽真空后,通入高纯氩气并保持在  $5.2 \times 10^4 \sim 10^5$  Pa 的真空度下时效,改善低温时在真空中的传热效果。表 2-41 为钛合金的固溶时效工艺规范。

表 2-41 钛合金淬火(固溶)时效工艺规范

合金牌号	固溶处理			时效处理		
	真空度(Pa)	固溶温度(°C)	时间(h)	时效温度(°C)	时间(h)	真空度(Pa)
TC3	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup>	820~920	0.5~2	450~500	2~12	10 <sup>-2</sup> ~10 <sup>-3</sup> 或 $5.2 \times 10^4 \sim 10^5$ Pa 氩气
TC4		850~950		450~550		
TC6		860~900		500~620		
TC8、TC9		900~950		500~620		
TC10		850~900		500~620		
TB1		800		480~500 550~570		
		800		500		

#### 4. 真空淬火工件的热处理质量

真空淬火的工件具有表面状态好、变形小、高的力学性能及长的使用寿命,因而得到广泛应用并迅速发展。

1) 真空淬火对工件表面质量的影响 产品愈精密,热处理后的表面质量如光亮度、氧化、脱碳等的要求也愈高。影响光亮度的因素有以下几种:

(1) 在真空状态下加热,对氧化物具有还原作用,淬火后工件相当光亮。温度越高(900~1 000°C 以上),效果越显著。

(2) 元素挥发的影响。在真空中高温加热时,钢中的 Cr、Mn 等元素易升华导致光亮度恶化,表面变得粗糙。为了避免元素升华,炉子真空度不宜过高,或者向炉内回充惰性气体,使其分压压力保持在 10~200 Pa 范围内为宜。

(3) 钢种的影响。含有铝、钛的不锈钢和耐热合金对微量氧非常敏感,在一般真空度下淬火,表面即变暗。因而往往在  $\leq 6.7 \times 10^{-2}$  Pa 真空度下加热。如果载气或冷却气体的纯度不够时,其中的微量活性杂质易使工件表面着色。要用高纯度的惰性气体进行淬火冷却,才可得到光亮的表面。

(4) 冷却方式的影响。油淬比气淬的光亮度低 20%~30%。这是由于钢的活性表面与油的高温分解产物

和残存碳、水分、酸等作用而被氧化、腐蚀及粘附的结果。工件加热后入油的温度愈高,上述作用愈强烈,工件表面的光亮度愈差。一般在 $1000^{\circ}\text{C}$ 以下入油,油淬的光亮度可达到原始状态的80%。

真空加热后水淬的工件表面容易发灰,淬火后应对表面进行处理,如涂防锈油等。

(5) 回火,特别是中温、高温回火,可使工件光亮度略有下降。结构钢回火后的光亮度较淬火后的下降3.8%~17%,工具钢则可下降2%~15%。

(6) 真空泵和油增压泵、油扩散泵的返油影响。冷阱设计不当,扩散泵壳体冷却水温过高,油蒸气会向被抽容器中返油,或炉子突然停电,手动蝶阀来不及关闭时,机械泵或油增压泵、油扩散泵中油被吸入炉内,沉积在炉壳内壁下部,污染加热室,使真空度抽不高,影响工件颜色。所以,对炉壁要定期进行清理。

(7) 真空淬火油的脱气。真空淬火油每次进出炉接触空气过程中会溶解一部分空气和水蒸气。应对淬火油进行充分脱气,特别是每天第一炉,脱气工作必须进行。

(8) 炉子的泄漏率影响处理工件光亮度。加热时间愈长,泄漏率对光亮度的影响愈大。真空炉的允许泄漏率大致为:在炉子真空度为 $10\sim 10^{-2}\text{Pa}$ 时为 $10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ ;  $10^{-3}\sim 10^{-4}\text{Pa}$ 时为 $10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ ;  $10^{-5}\sim 10^{-6}\text{Pa}$ 时为 $10^{-6}\sim 10^{-7}\text{Pa}\cdot\text{L/s}$ 。

压升率:一般资料介绍为 $1.3\sim 3.9\text{Pa/h}$ 。国产炉控制在 $0.67\sim 1\text{Pa/h}$ ,炉子使用一段时间后压升率应在 $10\text{Pa/h}$ 之内。

(9) 加热速度的影响。工件在加热过程中,吸附在工件表面、炉内构件等物体表面上的气体会释放出来。如气体来不及被真空泵抽走,炉内真空度就会下降,这将影响工件的表面光亮度。为此,炉子应带有真空度与温度的连锁控制装置,以限制炉子的温升速度。例如,真空炉的工作真空度若为 $2.66\text{Pa}(2\times 10^{-2}\text{Torr})$ ,当炉内真空度差于预先设定的值(如在 $4\sim 12\text{Pa}$ ,即 $3\times 10^{-2}\sim 9\times 10^{-2}\text{Torr}$ 范围内可按需调节),炉子将自动停止升温,并被保持在当时的温度,继续抽真空后,随着真空度的提高,炉子才能继续加热升温。

(10) 充氮管道的漏气。管道连接要采用平面密封结构,用O形橡胶圈压紧或采用焊接的方法,不宜用螺纹连接。在炉子调试时应先用真空泵进行管道检漏,并抽出剩余气体。

(11) 工艺结束后工件从真空炉内取出的时间不能太早,否则热工件接触空气后就会变颜色,工件温度应降至 $65^{\circ}\text{C}$ 左右出炉。

2) 真空淬火工件的畸变 与常规热处理畸变相似,引起真空淬火变形的原因是热应力、组织应力和机械加工或电火花加工产生的残留应力。真空热处理的畸变较小,一般为盐浴热处理畸变的 $1/3\sim 1/6$ (指工件相对尺寸的变形小,不包括细长工件的弯曲变形)。

(1) 真空热处理畸变较小的原因。

① 炉室内加热元件均匀分布,多段预热和辐射加热使工件升温速度缓慢,工件受热均匀,热应力小。

② 目前广泛应用的对流加热( $150\sim 850^{\circ}\text{C}$ , $0.12\sim 0.2\text{MPa}$ 氮气),使工件内外温差更小,进一步降低了热应力。

③ 真空加热的奥氏体温度较低,碳和合金元素的溶解通过低温长时间达到,晶粒细化,强度、韧性好,组织应力减小。

④ 日益广泛应用的气淬工艺,其循环气流合理,(上下交替或 $360^{\circ}$ 环形分布冷却)使工件能均匀冷却。对于单室气淬炉,工件不移动也有利于减少变形。

⑤ 对于形状复杂的大尺寸模具,采用模拟分级等温冷却,工件心部、表面温度可控制在一定温差内,进一步降低了组织应力。

(2) 减小真空淬火畸变的具体措施。

① 加热技术:

a. 为减小真空淬火畸变,普遍采用缓慢升温和多段预热,在钢的相变点( $800\sim 850^{\circ}\text{C}$ )附近作充分停留保温。

b. 在 $\leq 850^{\circ}\text{C}$ 预热阶段,真空炉可通入惰性气体(压力 $0.12\sim 0.2\text{MPa}$ )进行对流加热,以减少工件的温差、改善其温度均匀性,并提高生产效率。

c. 提高炉温均匀性。一般在 $550\sim 1350^{\circ}\text{C}$ 范围内,真空炉的炉温均匀性为 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。合理布置加热元件,采用多侧或环形分布结构;提高加热室隔热效率;正确确定有效加热区,一般边缘距加热器至少 $40\text{mm}$ ;合理控制



炉内压强,在高温真空下,由于没有气流干扰,有效加热区内温差较小。当真空度为  $10^{-3}$  Pa 时,温差  $< \pm 5^{\circ}\text{C}$ ,当压强上升到 5 320 Pa 时,温度均匀性恶化。所以回充气体分压时,不宜过高,一般在 10~200 Pa 范围内为宜。提高温度测量和控制精度,用微机控制温差可达到  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  左右。

### ② 冷却技术:

a. 真空气淬工件的畸变量大大小于真空油淬工件。所以对形状复杂的高合金、高速钢类工模具钢,应尽量采用真空气淬工艺。

b. 截面尺寸较大的工模具在双室油气淬真空炉内处理时,为获得良好的显微组织,采用先油淬、然后再在  $M_s$  点以上的温度出油,并继续气冷的油淬气冷工艺,可减少工件的畸变。

c. 高压气淬——分级淬火。对一些形状复杂、尺寸较大的高合金钢模具,在 0.6~1.2 MPa 气压下先快速气冷,以避免合金碳化物的析出,随后工件在分级区均温后再在 0.2 MPa 压力下缓冷。这种高压气淬分级冷却方法可以有效减少工模具变形。

d. 真空油淬时,采用热油淬火,控制搅拌器的开始时间及搅拌的剧烈程度,可减少工件畸变。

e. 尽量减少在热态下移动工件以减少工件畸变。

f. 采用合适的料盘与工装夹具以利于均匀加热和冷却,其材料应耐高温、热容量小,防止由于它们的变形造成工件的额外变形。

g. 以氧化铝棉或不锈钢薄片包扎结构复杂工件的锐角及薄壁处,在深型腔处可填充金属块(或钢球)以减少因厚薄不均匀引起的畸变,还可根据工件形状特点,采取局部机械夹固的方法。

h. 应根据工件形状、大小、装炉量采用合理的装炉方法。

i. 根据淬火工件特点,合理选择炉室形状。高压气冷淬火时,气体循环方式有上下交替式冷却(方形炉室)和环形分布径向喷气冷却(圆形炉室)。一般规律是:单件(或几件)大尺寸模具,选用圆形炉室为宜;对形状单一的中小件批量生产的工具(分 2~4 层)选用方形炉室。这种选择有利于工模具的均匀加热和冷却。

3) 真空淬火后钢的力学性能 真空加热时,工件不氧化,不脱碳,表面呈活性状态。因此,真空淬火工件硬度均匀、波动小,具有较好的力学性能。表 2-42 为 Cr12MoV 钢真空淬火回火后与盐浴淬火、回火后力学性能的比较。

表 2-42 Cr12MoV 钢真空淬火、回火与盐浴淬火、回火后力学性能的比较

淬火温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	回火温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	$R_m(\text{N}/\text{mm}^2)$		挠度 $f(\text{mm})$		$\alpha_k(\text{J}/\text{cm}^2)$		真空处理硬度 HRC		盐浴处理硬度 HRC	
		真空	盐浴	真空	盐浴	真空	盐浴	淬火态	淬回火态	淬火态	淬回火态
950	180	4 239	3 105	4.3	2.87	12.7	18.4	60.8	61	61.3	60.5
980	180	3 756	2 814	4	2.4	21.6	14.7	64.7	61.9	65.8	63
1 020	240	3 851	3 048	4.4	2.36	21.6	21.6	65.8	60.8	66.2	60.8
1 080	240	3 584	2 139	4.1	1.76	25.1	14.7	61.9	58.6	65.5	59.7
1 120	520(两次)	2 501	2 755	5.1	3.5	27.5	26.5	55.3	55.6	59.3	60.7

注:真空淬火:800 $^{\circ}\text{C}$ 预热 25 min,淬火保温 20 min 油冷(采用标准试样);

盐浴淬火:淬火温度为 950~1 020 $^{\circ}\text{C}$ 时,400 $^{\circ}\text{C}$ 预热 1 h,淬火加热保温 9 min;

淬火温度为 1 080~1 120 $^{\circ}\text{C}$ 时,850 $^{\circ}\text{C}$ 预热 6 min,淬火加热保温 3 min,600~650 $^{\circ}\text{C}$ 分级预热 2~3 min 后空冷。

真空淬火可大大降低对氢脆敏感的高强度钢的含氢量和其他气体的含量。例如,原始含氢  $6.4 \times 10^{-4}\%$  的 30CrMnSiNi2A 钢在进行电炉加热油淬后,氢含量为  $13.0 \times 10^{-4}\%$ ,盐浴炉油淬后为  $6.2 \times 10^{-4}\%$ ,真空炉油淬后降至  $4.9 \times 10^{-4}\%$ 。真空淬火后,钢材的裂纹失稳扩展,抵抗脆性断裂的能力有所提高。例如 30CrMnSiNi2A 钢,900 $^{\circ}\text{C}$ 进行真空油淬、250 $^{\circ}\text{C}$ 回火后,在双向(拉压)动态疲劳试验机上进行试验,断裂韧度  $K_{Ic}$  为  $94.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,在进行普通油淬回火后的  $K_{Ic}$  为  $88.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

4) 真空淬火产品的使用寿命及后续的打磨抛光 实践证明,真空淬火处理工件的使用寿命较常规工艺处理的工件有明显提高。成型模的打磨抛光工时可减少 1/4~1/3。如某冷冲模,以往盐浴炉淬火的刃磨一次使用寿命为一万次左右,而经真空淬火后可提高到六万次左右。冷冲模也相应地由(3~4)万次提高到(6~8)万次。

RS2-002 精密成型模(材料 7CrSiMnMoV)最终加工后经真空淬火,其畸变量大多在 0.03 mm 之内,表面呈光亮色,打磨抛光工时减少 1/4~1/3。

### 5. 真空淬火实例

#### 1) 高速钢齿轮滚刀的真空气淬

材料: W6Mo5Cr4V2;规格: 模数 3 mm;尺寸: 外径×长度×孔径=80 mm×80 mm×27 mm;

设备: 真空气淬炉 VDN-513R(波兰);工作室尺寸: 600 mm×600 mm×900 mm;装载质量: 250 kg;

工艺: 预热——850℃, 60 min; 1 000℃, 45 min;

奥氏体化——1 215~1 220℃, 30 min;

冷却——0.6 MPa 高纯氮气淬冷至 65℃ 出炉;

回火——550~560℃, 60 min×3 次。

按齿轮滚刀产品质量分等规定: 切削长度达 14 m 为一等品、21 m 为优等品,本批真空气淬滚刀的平均切削寿命为 22.5 m 属优等品,而国内相应的盐浴热处理齿轮滚刀出厂标准为一等品(切削长度大多为 14 m 水平)。

滚刀齿尖前刃受小能量连续冲击载荷,按照刀具磨损的一种新观点认为,切削产生的磨损是由许多微崩口(晶粒的逐一剥落)积累而成的,在相同硬度时真空气淬的韧性要高于盐浴淬火,因而产生的微崩口(磨损)程度小。另外,真空淬火滚刀的内孔畸变量仅为盐浴处理的 1/6,并显著地降低了淬火应力,从而减少了热处理生产中的次废品。

#### 2) 大模数双刃高效齿轮滚刀的高压气淬和模拟分级等温冷却

材料: 粉末冶金高速钢 S390 [BOHLER 公司,成分为 W10Mo2Cr5V5Co8( $\omega_c$ 1.6%)];

滚刀规格: 模数 14 mm,尺寸: 外径×长度×孔径=220 mm×260 mm×60 mm;

单件质量: 31.5 kg;

技术要求: 66~67HRC。

因滚刀尺寸太大,如采用通常的高速钢,其碳化物均匀度极差,也无法用锻造的方法加以改善;而采用粉末冶金高速钢,其碳化物颗粒细小均匀,各向同性,热处理后力学性能优良,冷热加工的工艺性能良好。

由于该滚刀齿形为主、副齿结构,形状特殊,齿形尖而薄,热处理不当极易引起“掉齿”,选用分级等温冷却,可以减少内应力,防止畸变和开裂。所用设备为 H3636-12bar 气淬真空炉。

热处理工艺要点(图 2-26):

(1) 预先在工件(可利用同样尺寸的试件)心部和表面各安装 1 支工件热电偶。

(2) 去应力处理,消除加工应力。

(3) 分三段预热至 1 190℃奥氏体化,心部热电偶到温并保温后 0.7 MPa 气淬,冷却至 300℃时进行模拟分级等温保持 30 min。随后冷却压力降至 0.2~0.3 MPa,缓慢冷却至 65℃ 出炉。

(4) 540~550℃及时回火,每次保温 2 h,共 4 次。

(5) 第一、第二次回火之间进行冷处理(-120℃,保温 2 h)。

处理结果: 淬火晶粒度 11<sup>\*</sup>,回火程度 1 级(充分),硬度 66.5~66.8HRC。该滚刀在滚削  $\phi$ 1.6 m×0.3 m 大齿轮时(材料 40CrMnMo 调质件),切削效率比原来提高两倍以上。

曾对尺寸更大的双刃滚刀进行热处理(外径×长度×内径=295 mm×340 mm×80 mm,模数 25 mm,单件质量 57 kg),处理结果: 硬度 66.5~67HRC,内孔畸变量 0.16 mm,取得了满意结果。又对 M42 高速钢带锯齿条滚刀采用类似工艺也取得了良好的效果。

3) H13 压铸模的高压气淬真空热处理 所用淬火设备和压铸模实样见图 2-27、图 2-28。采用的 H13 钢真空热处理工艺见图 2-29,其工艺要点如下:

(1) 预先经 600~650℃去应力处理。

(2) 二段预热后加热至(1 030±5)℃,心部到温后保温足够时间。

(3) 由 1 030℃冷却至 540℃的淬火冷却速度应达到 28℃/min。

(4) 冷至 400~450℃范围时进行分级等温保持 30 min。

(5) 随后降低冷却气体压强至 0.2~0.3 MPa,缓冷至 65℃ 出炉。

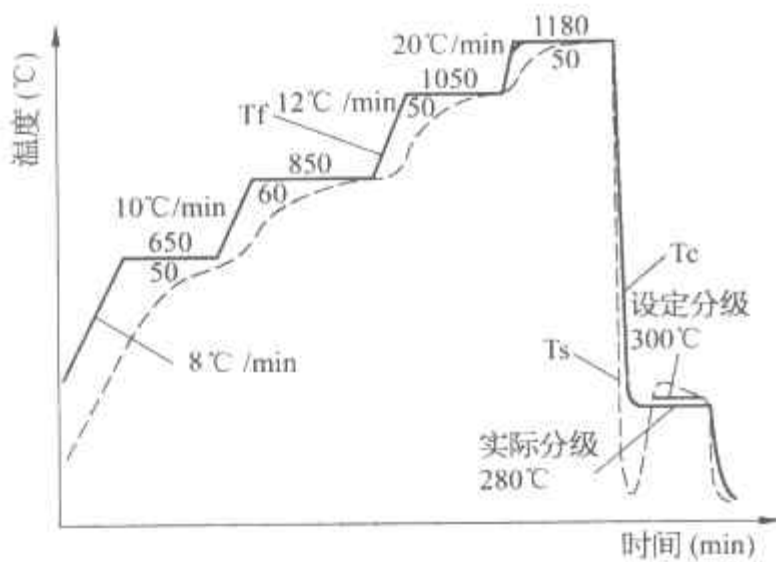


图 2-26 大模数齿轮滚刀 0.7 MPa 真空气淬工艺记录曲线

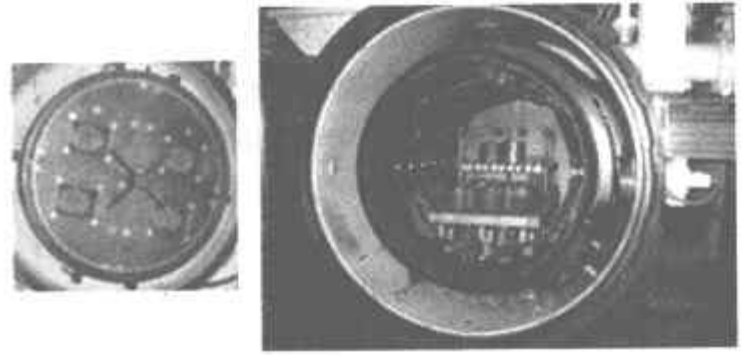


图 2-27 压铸模淬火所用真空气淬炉

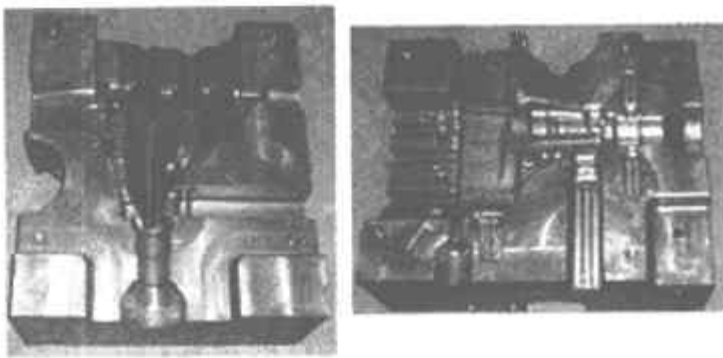


图 2-28 H13 钢压铸模实例

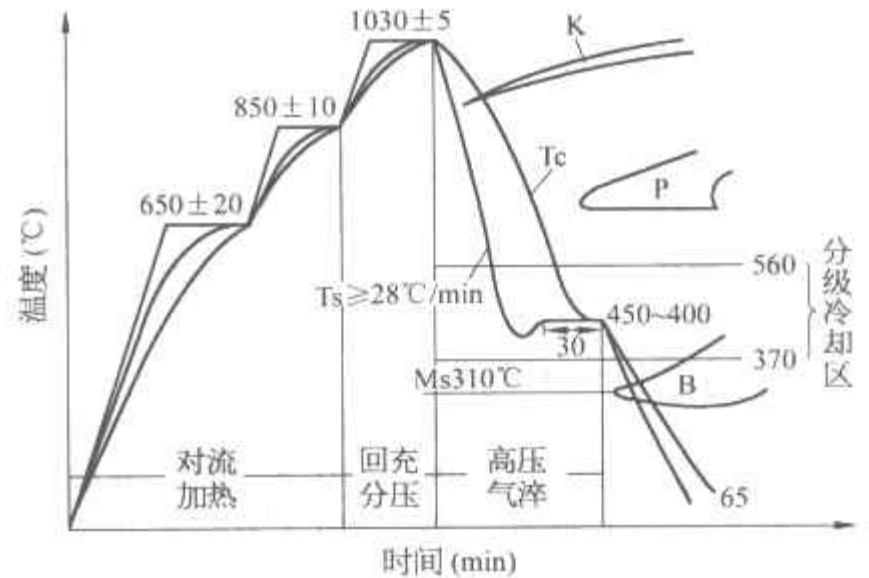


图 2-29 H13 压铸模热处理工艺曲线

(6) 按照模具尺寸和硬度要求,用 560~600°C 进行 2~3 次回火,保温时间按 60 min/25 mm 或模具心部到温后保持至少 2 h 计算。

(7) 模具热处理硬度在 44~46HRC 时有较佳的强度、韧性配合。

对 H13 大型复杂模具推荐 42~44HRC,可以提高韧性,防止开裂。对小型简单模具选用 46~48HRC,可以提高使用寿命。H13 淬火显微组织见图 2-30。

注意事项:

(1) 在模具毛坯加工之前,要预先正确地估计模具热处理的畸变量,尤其对于尺寸大、型腔复杂的 H13 模具应留有一定的加工余量。

(2) 模具在热处理后,型腔经电火花或精加工后,表面易产生变质层,必须进行打磨抛光去除变质层或补充一次去应力处理(低于回火温度 20~30°C),以免使用中发生早期开裂。

(3) 对于模具厚度 ≥ 250 mm 或质量 ≥ 500 kg 的大模具,推荐采用气淬压力 ≥ 1 MPa,避免由于冷却速度低而产生多量的贝氏体组织,影响模具使用寿命(图 2-31)。

(4) 真空气淬压力越高,冷却越快,组织性能和使用寿命越佳,但淬火畸变相应也增大,该畸变量应达到双方商定的要求。为此,模具在热处理时,工件应合理装载、采用合理的热处理工艺以及分级冷却工艺等,尽可能减少热处理畸变。

国内外先进的制模方法是先将模具毛坯留有较大的加工余量(粗坯)淬火,随后采用高速数控铣床和超硬刀具进行模具加工或进一步用数控磨床精磨型腔,这种方法是目前解决模具热处理畸变问题较为科学和合理的方法。

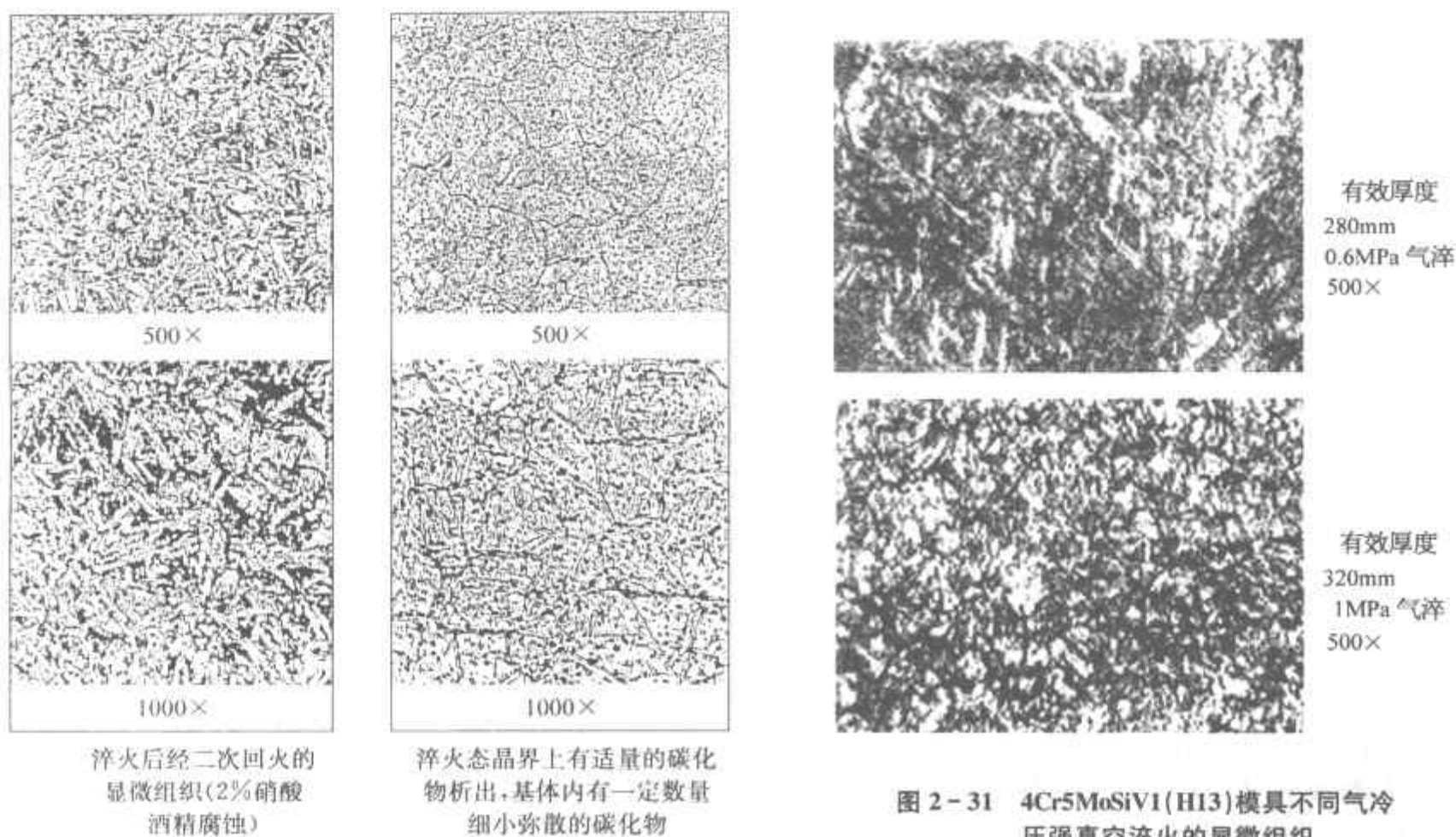


图 2-30 H13 淬火显微组织

## 4) 100 目不锈钢网滚模模芯(图 2-32)

材料: Cr12MoV; 技术要求: 58~62HRC。

此件为加工六角形不锈钢网用,要求很高。在 $\phi 50$  mm 处的六角形网眼要用放大镜才能看清楚。原采用盐浴淬火,由于残盐嵌在六角形网眼中,既费时又极易损坏网眼而导致报废。采用真空热处理后模芯表面光洁,合格率达 100%,使用寿命也比原来提高。其热处理工艺见图 2-33。本模芯在 ZC-30 型双室负压油淬炉内处理。若在 0.3~0.5 MPa 真空气淬炉内处理,其淬火效果更佳。

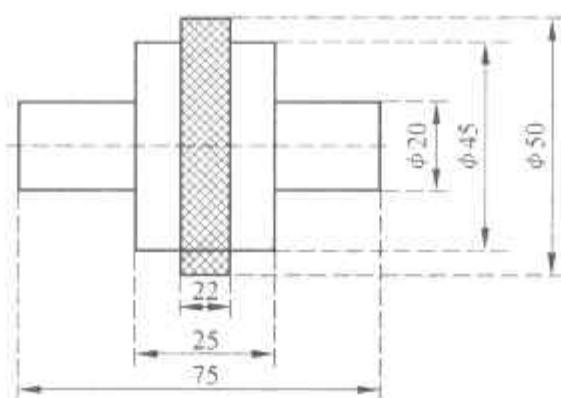


图 2-32 100 目不锈钢网滚模模芯

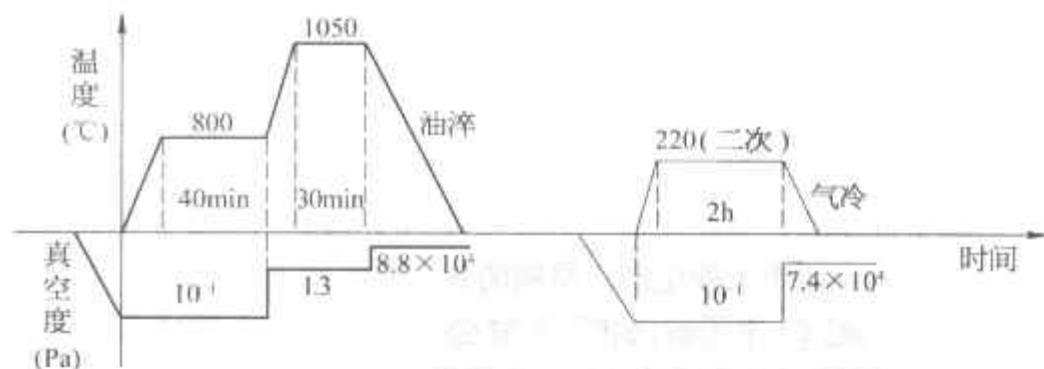


图 2-33 不锈钢网滚模模芯真空热处理工艺曲线

## 5) 波形弹簧片

材料: 50CrV 或 60Si2Mn; 技术要求: 热处理后硬度 40~45HRC。

此弹簧片用 0.15~0.5 mm 冷轧带钢冲制。最大波形弹簧片规格为 $(\phi 80 \sim \phi 65)$  mm $\times$ 0.5 mm, 最小规格为 $(\phi 15 \sim \phi 6.5)$  mm $\times$ 0.5 mm, 为压缩机的关键零件之一。工作条件恶劣,使用温度 180 $^{\circ}$ C, 工作压力 0.7 MPa, 每分钟压缩跳动 1450 次, 冲击力大, 并要有良好的密封性能。对弹簧片波形的高低及硬度等技术要求很高。

此零件开始用盐浴炉淬火,后改用保护气氛震底炉淬火,淬火后硬度不高,使用寿命不理想。最终采用真空淬火试验,取得了十分良好的效果,使波形弹簧片的质量上升为优等品,装车连续运转一万小时还未损坏(优

等品为 64 h)。弹簧片真空热处理工艺见图 2-34。所用热处理设备: ZC-30 型双室油淬炉。

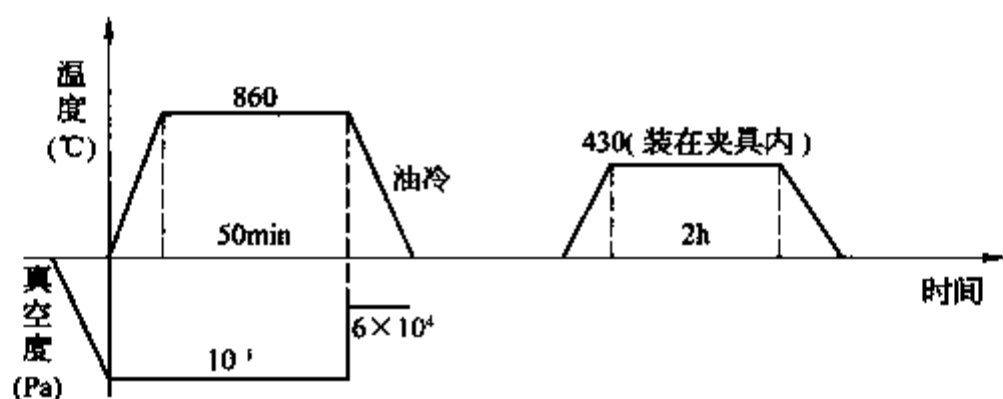


图 2-34 波形弹簧片真空热处理工艺曲线

#### 6) 空心杯转子(图 2-35)

材料: 2J23。

技术要求: 热处理后无裂纹、畸变小。磁场强度  $H_m = (4.5 \sim 5.5) \times \frac{10^4}{\pi} \text{ A/m} (180 \sim 220 \text{ Oe})$ , 磁感应强度  $B_m = 1 \sim 1.3 \text{ T} (10\,000 \sim 13\,000 \text{ Gs})$ 。

原采用盐浴淬火易产生开裂。同时盐浴的腐蚀性大, 质量不稳定。

采用真空淬火后, 经磁滞性能测试和探伤以及实际使用, 完全符合原技术要求。处理出来的零件, 表面光洁, 晶粒细小, 不会产生淬火开裂现象, 现在已应用于生产, 其具体工艺见图 2-36。本工件在 ZC-30 型双室油淬真空炉内处理, 也可在高压气淬炉内气淬, 气淬压力  $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ , 其质量更好。

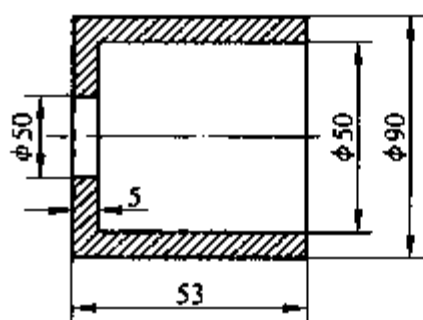


图 2-35 空心杯转子

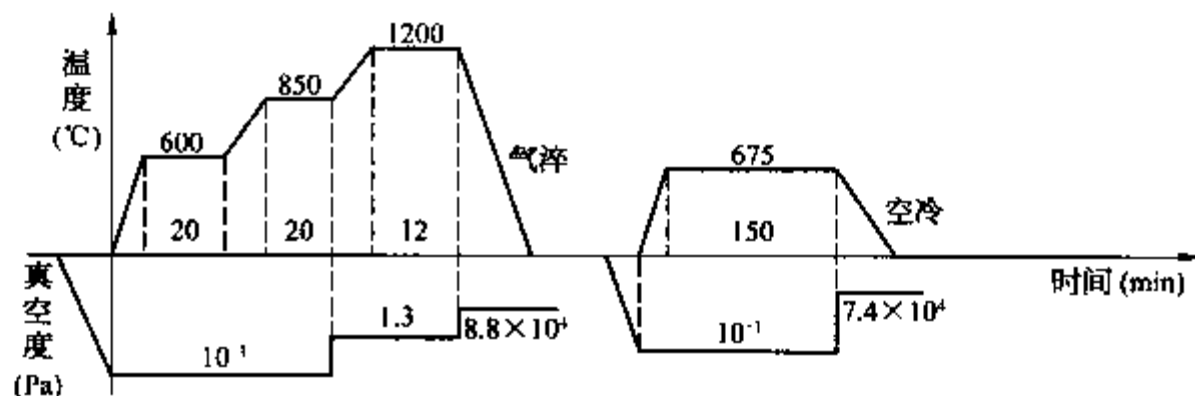


图 2-36 空心杯转子真空热处理工艺曲线

## 六、真空渗碳

真空渗碳就是零件在真空中加热, 在负压渗碳气氛中进行渗碳的工艺方法。真空渗碳已在 20 世纪 70 年代初期开始应用于工业生产。早期的真空渗碳在外热式真空炉中进行, 后来在一般内热式真空炉中进行真空渗碳。20 世纪 90 年代初, 法国 ECM 公司专利技术 INFRACARB® 在真空渗碳中得到广泛的应用。90 年代中期, 易普森国际有限公司的 AVac 乙炔低压渗碳工艺在工业中应用, 更进一步推动了真空渗碳工艺的应用和发展。

### (一) 常规的真空渗碳

#### 1. 真空渗碳工艺过程

(1) 零件清洗、去除油脂及污物。

(2) 零件的放置。对新使用料框、料盘和装夹具需进行一次渗碳处理。料盘一般用耐热不锈钢材料。零件插放或堆放, 对小零件要用不锈钢网分层夹开。所用铁丝必须去除镀锌层。

(3) 抽真空开始加热和均热。零件入炉后抽真空到  $66.5 \text{ Pa} (0.5 \text{ Torr})$  开始加热, 升温、预热和均热。当工件温度达到渗碳温度并均匀一致后通入渗碳气体进行渗碳。均热的目的: 使渗碳工件温度均匀一致, 以获得均匀的渗碳层; 去除工件表面的氧化物及油脂、污物, 使零件表面活化, 有利真空渗碳。



(4) 渗碳工艺。普遍使用周期式真空渗碳炉,经常采用的工艺流程见图 2-37。

① 渗碳剂。主要使用甲烷、丙烷或乙炔等气源,其纯度要求在 96% 以上。

② 渗碳温度。一般为  $900 \sim 1100^{\circ}\text{C}$ , 渗碳温度选取应考虑的因素有渗碳时间、渗碳层深度、碳浓度、渗层均匀性、变形要求、晶粒度、力学性能变化等。当零件形状较复杂、变形量要求严格、渗层深度要求均匀时宜采用较低温度渗碳。表 2-43 为选取渗碳温度的一般情况。

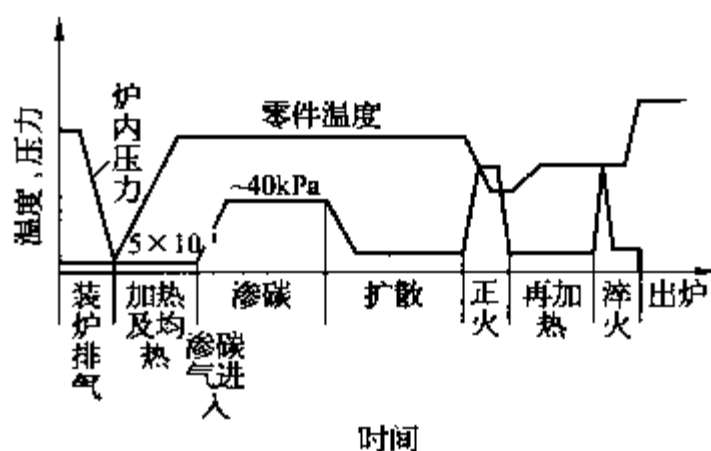


图 2-37 真空渗碳工艺流程

表 2-43 渗碳温度的选用范围

温度范围	零件形状特点	渗层深度	零件类别	渗碳气体
$1040^{\circ}\text{C}$ (高温)	形状简单, 变形要求不严	深	凸轮、轴、齿轮	$\text{CH}_4, \text{C}_3\text{H}_8 + \text{N}_2$
$980^{\circ}\text{C}$ (中温)	一般	一般	—	$\text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_2\text{H}_2, \text{C}_3\text{H}_8 + \text{N}_2$
$980^{\circ}\text{C}$ 以下 (低温)	形状复杂, 变形要求严格, 渗层要求均匀	较浅	柴油机喷嘴等	$\text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_2\text{H}_2, \text{C}_3\text{H}_8 + \text{N}_2$

③ 渗碳方式。有一段式、脉冲式和摆动式三种工艺方式, 见图 2-38。

一段式(图 2-38a): 工艺过程只有一个渗碳期和扩散期, 渗碳期向炉内通入一定量甲烷、丙烷或乙炔, 并达到一定压力(约  $39\ 900\ \text{Pa}$  即  $300\ \text{Torr}$ )。扩散期是渗碳结束后, 抽走渗碳气体, 使炉内达到工作真空度。并继续加热一段时间的处理, 消耗渗碳气体量少。

脉冲式(图 2-38b): 渗碳气以脉冲方式通入炉内并排出, 一个脉冲内既渗碳又扩散的方法。

摆动式(图 2-38c): 渗碳期以脉冲方式充气 and 排气之后, 再有一段扩散渗碳。

对窄缝、盲孔的内表面有渗碳深度、浓度和均匀度要求的零件则宜采用脉冲式和摆动式渗碳。

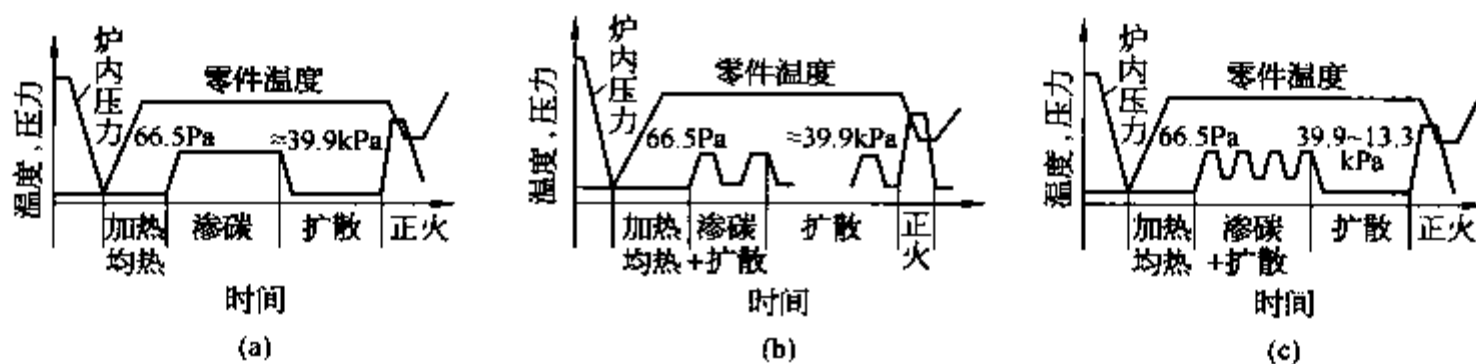


图 2-38 几种真空渗碳工艺流程

(a) 一段式; (b) 脉冲式; (c) 摆动式

④ 渗碳气的压力和流量。渗碳气的流量以能使炉内压强保持  $133\ \text{Pa/s}$  的增速为宜。一段式渗碳工艺, 以甲烷作渗碳气体时, 炉内压强为  $26\ 600 \sim 46\ 550\ \text{Pa}$  ( $200 \sim 350\ \text{Torr}$ ) 范围。丙烷作渗碳气体时, 压强  $13\ 300 \sim 23\ 275\ \text{Pa}$  ( $100 \sim 175\ \text{Torr}$ ) 范围。高的渗碳气体压强将使渗碳速度加快, 炉内各零件之间及零件本身各部位渗层较均匀。如渗碳炉中装有搅拌风扇, 将使渗碳气产生流动, 加快渗碳速度, 促进渗碳气的热分解以及使渗层更为均匀。但高压强渗碳气将产生较多的炭黑, 故在保证渗层均匀性的前提下, 应选取尽可能低的渗碳压强。对脉冲式渗碳工艺而言, 渗碳效果主要受脉冲式充气和抽气的影响, 风扇的搅拌作用小, 因此, 渗碳气的压强可小些, 一般在  $19\ 950\ \text{Pa}$  ( $150\ \text{Torr}$ ) 就可以了, 渗碳时搅拌风扇可不必开动。

⑤ 渗碳时间。在渗碳气中的碳浓度与奥氏体中碳饱和溶解度相等的情况下, 渗碳深度  $D$  与渗碳温度  $T$ , 渗碳总时间  $t$  的关系式如下:

$$D = \frac{802.6\sqrt{t}}{10^{\frac{6700}{T}}} = K\sqrt{t}$$

- 式中  $D$ ——总渗碳深度(mm);  
 $t$ ——渗碳总时间,包括渗碳和扩散时间(h);  
 $T$ ——渗碳温度(K);  
 $K$ ——渗碳速度系数(表 2-44)。

表 2-44 不同温度下的  $K$  值

渗碳温度(°C)	925	945	982	1010	1038
$K$	0.637	0.738	0.865	1.018	1.500

当要求渗碳层深度为  $D$  时,可按下式求出渗碳和扩散时间:

$$t_1 = t \left( \frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0} \right)^2 \quad t = t_1 + t_2$$

- 式中  $t$ ——渗碳所需总时间;  
 $t_1$ ——渗碳时间;  
 $t_2$ ——扩散时间;  
 $C_1$ ——扩散结束后表面碳浓度;  
 $C_2$ ——渗碳期结束后表面碳浓度;  
 $C_0$ ——钢表面原始含碳量。

除此之外,还可按图 2-39、图 2-40 查出渗碳时间和扩散时间。

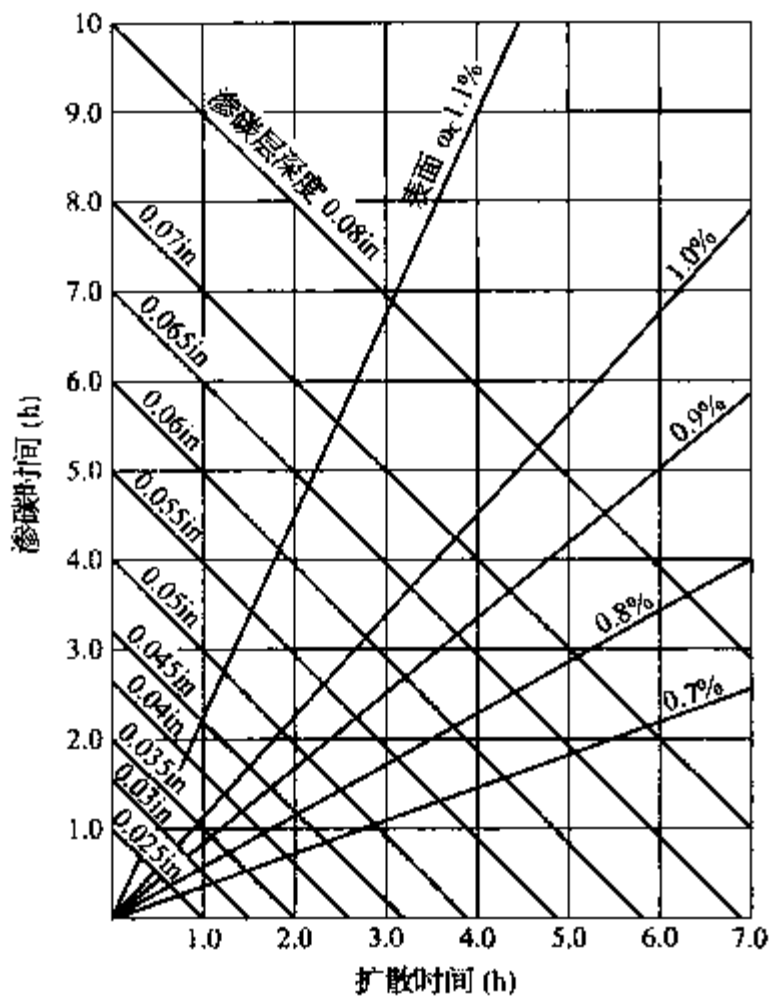


图 2-39 930°C 下渗碳层深度表面  $\omega_c$  与渗碳、扩散时间的关系

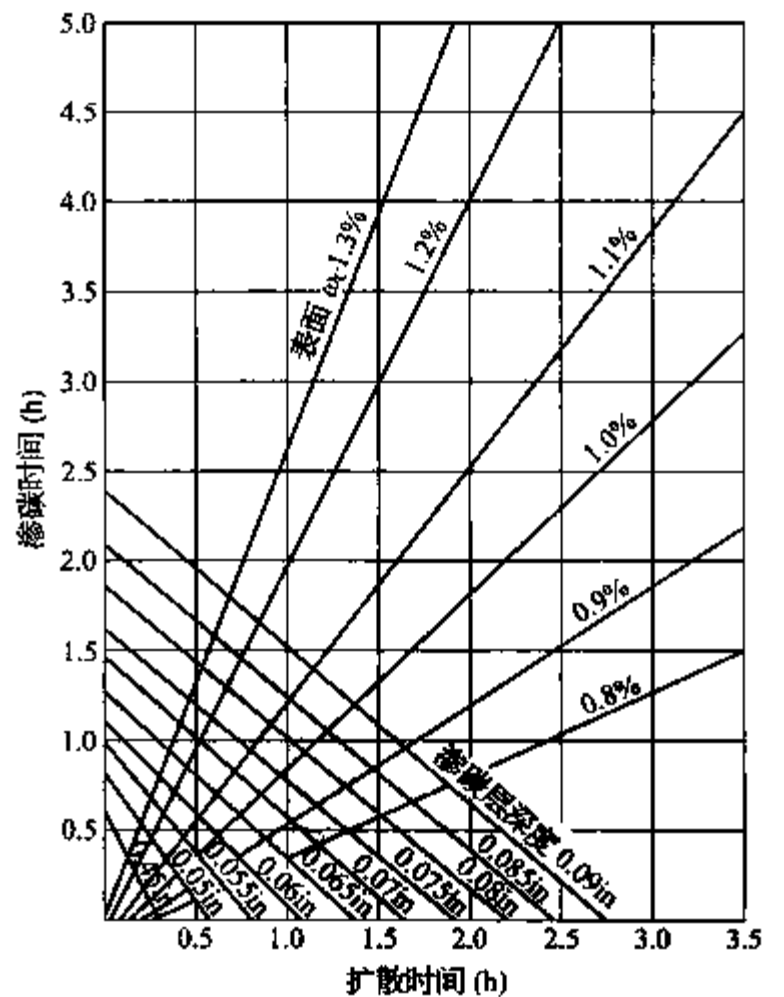


图 2-40 1040°C 下渗碳层深度的表面  $\omega_c$  与渗碳、扩散时间的关系

图 2-41 为渗碳温度、渗碳时间与总渗碳深度的关系曲线。可以看出,随着渗碳温度的提高,渗碳效率将大大提高。对低碳钢而言,总渗碳深度与渗碳温度和时间关系可用公式进行计算,得出渗碳深度、渗碳温度和渗碳时间之间对应数据,见表 2-45。

表 2-45 渗碳温度、渗碳时间与总渗碳深度的关系

总渗碳深度 (mm) 渗碳时间(h)	渗碳温度(°C)					
	899	927	982	1010	1066	1093
0.10	0.169	0.201	0.275	0.319	0.421	0.480
0.50	0.379	0.449	0.616	0.714	0.942	1.073
1.00	0.536	0.635	0.871	1.009	1.332	1.517
1.50	0.656	0.778	1.067	1.236	1.631	1.858
2.00	0.758	0.898	1.231	1.428	1.883	2.145
3.00	0.928	1.100	1.508	1.748	2.307	2.627
4.00	1.072	1.270	1.742	2.019	3.664	3.034
5.00	1.199	1.420	1.947	2.257	2.978	3.392
10.00	1.695	2.008	2.754	3.192	4.212	4.797
15.00	2.076	2.459	3.373	3.910	5.158	5.875
20.00	2.397	2.839	3.894	4.514	5.956	6.784
25.00	2.680	3.174	4.354	5.047	6.659	7.584

⑥ 渗碳期与扩散时间的确定。根据公式可分别求出渗碳总时间、渗碳过程所需的渗碳期时间和扩散期时间。

⑦ 脉冲充气最高压强  $p_0$ 、流量和周期的确定。

a. 脉冲充气最高压强  $p_0$  的确定: 在一般情况下  $p_0 = 15.96 \sim 19.95 \text{ kPa} (120 \sim 150 \text{ Torr})$ 。当装炉量及渗碳表面积很小时,可适当减少  $p_0$  值。

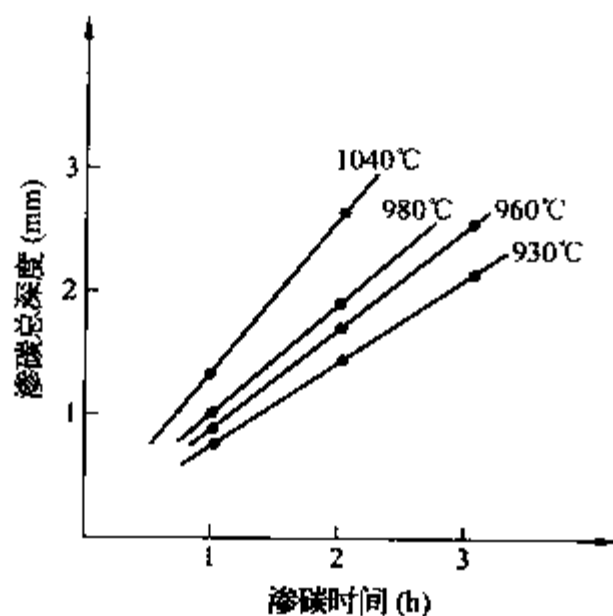


图 2-41 渗碳温度、渗碳时间与总渗碳深度的关系曲线

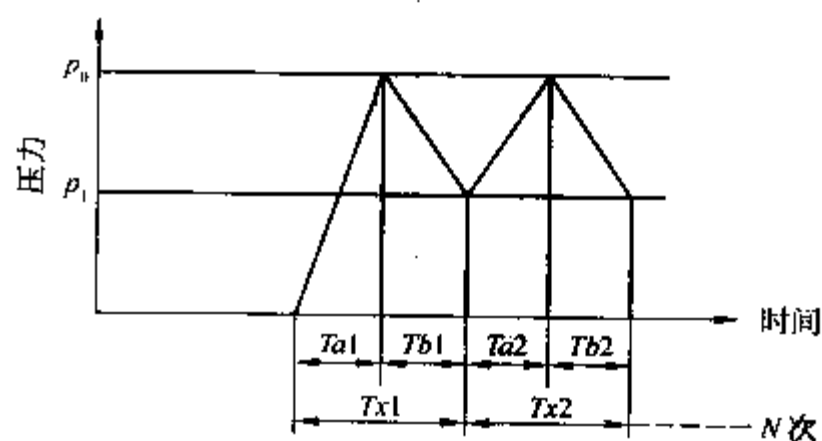


图 2-42 脉冲周期和次数的设定



b. 流量：可按炉膛容积大小及压升速度为 133 Pa/s 来确定。

c. 脉冲周期  $T_x$  的确定。从图 2-42 中可见，在  $T_a$  时间内，渗碳气体通入炉中，当炉中渗碳气压力到  $p_0$  之后即停止供气并开始排气。一般取  $T_a$  的两倍（即  $T_a = T_b$ ）为一个脉冲周期  $T_x$ 。当  $T_a \approx T_b$  时，则  $p_1$  值将在几个周期之后趋于一个固定值。

d. 脉冲次数  $N$  的确定。以渗碳期时间除以脉冲周期  $T_x$  得出脉冲次数  $N$ 。

⑧ 渗碳后热处理：零件渗碳后即可出炉气淬或油淬。对高温渗碳后的零件，为细化晶粒可后续一次正火处理，再重新加热进行淬火。

⑨ 非渗碳表面防护措施：工件进炉前先涂防渗碳涂料或镀铜处理以防止渗碳。

⑩ 合金渗碳钢的真空渗碳参数的确定。上述对真空渗碳温度、时间等工艺参数的确定方法一般适用于碳素渗碳钢。合金渗碳钢中各种钢的渗碳能力不同。在实际生产中应根据钢号、零件的形状及装炉量等条件，通过工艺试验确定工艺参数。上述工艺参数只能作为参考，并应修正。

## 2. 真空渗碳应用实例：柴油机长型喷油嘴针阀体（图 2-43）

工作条件：此针阀体是一种具有细长中孔，端部有  $\phi 0.3 \sim \phi 0.5$  mm 喷油孔的零件；工作条件恶劣而复杂，头部要承受  $200 \sim 260^\circ\text{C}$  的热负荷；要求零件具有高硬度、高耐磨、良好抗回火性、尺寸稳定性及高的冲击疲劳强度等。

材料：18Cr2Ni4WA。

热处理技术要求：渗碳层硬度  $\geq 58\text{HRC}$ ，全部渗碳层深度  $0.4 \sim 0.9$  mm，碳化物级别  $\leq 1 \sim 3$  级。

热处理设备：真空渗碳炉。渗碳工艺流程见图 2-44。

渗碳气体：99% 纯度丙烷。

冷却气体：99.999% 氮气。

渗碳结果：见表 2-46。

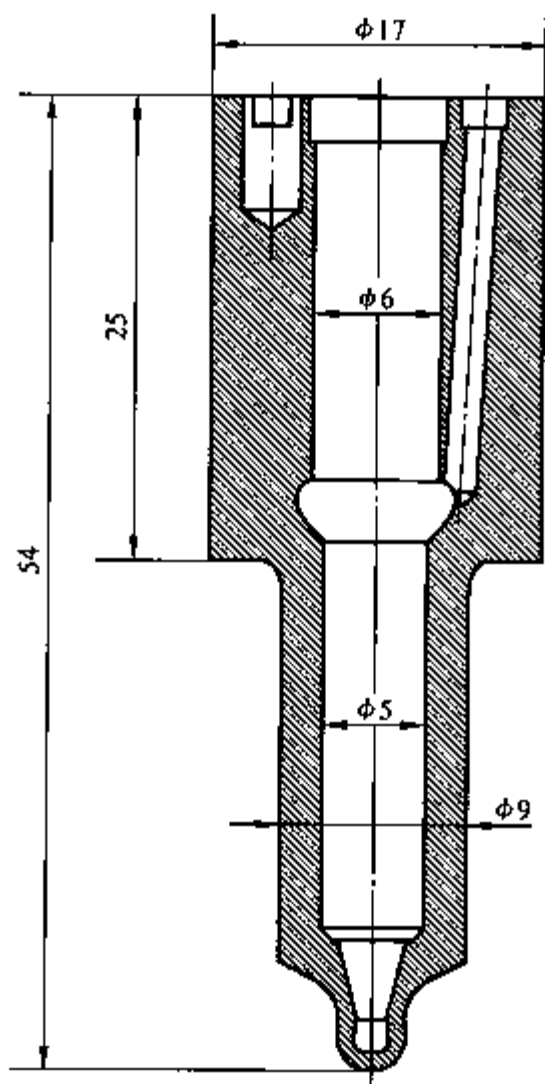


图 2-43 柴油机喷油嘴针

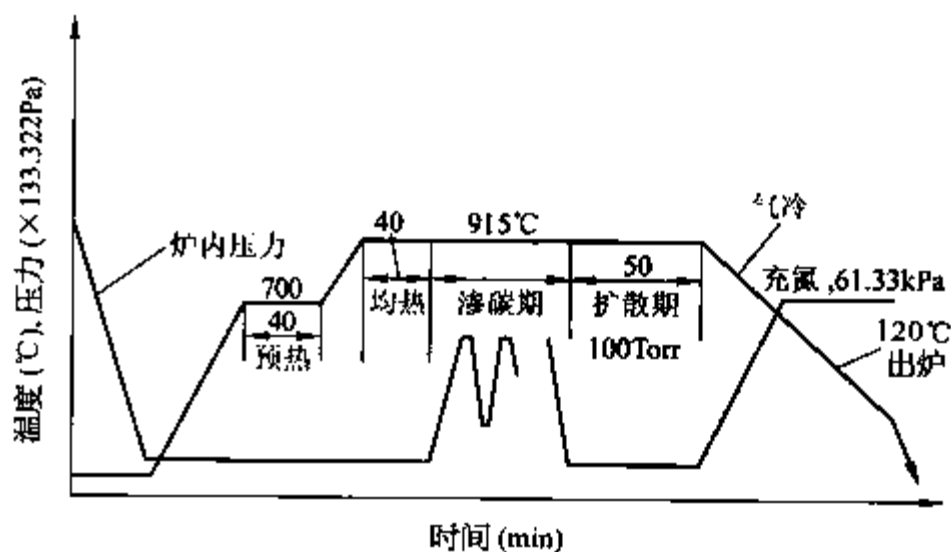
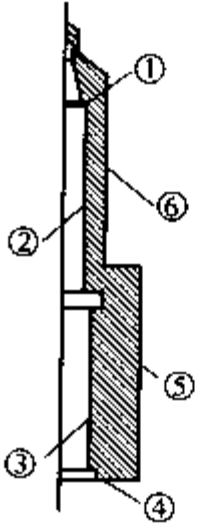


图 2-44 柴油机长型喷油嘴针阀体 (18Cr2Ni4WA) 渗碳工艺流程图

表 2-46 长型喷油嘴针阀体渗碳结果

测试部位	试样编号	各部位渗层深度(mm)						备注
		①	②	③	④	⑤	⑥	
	1	0.64	0.43	0.68	0.74	0.76	0.73	1) 工作面碳化物浓度级别均为 1~2 级 2) ②部位为非工作表面
	2	0.66	0.48	0.78	0.84	0.84	0.78	
	3	0.60	0.42	0.66	0.72	0.72	0.66	
	4	0.54	0.42	0.72	0.78	0.78	0.78	
	5	0.55	0.36	0.80	0.84	0.86	0.65	
	6	0.60	0.30	0.60	0.66	0.66	0.60	
	7	0.84	0.56	0.72	0.72	0.73	0.72	
	8	0.58	0.30	0.76	0.84	0.80	0.78	
	9	0.50	0.62	0.76	0.72	0.80	0.78	
	10	0.60	0.54	0.80	0.84	0.88	0.86	
	平均值	0.61	0.44	0.73	0.77	0.78	0.73	

## (二) 低压真空渗碳

### 1. 低压真空渗碳的优点(与传统气体渗碳工艺相比较)

- (1) 产品无内氧化,能显著提高零件表面疲劳性能。
- (2) 产品热处理畸变小,甚至可取代压床淬火。
- (3) 渗层控制精度高,计算机模拟控制精度可达 $\pm 0.05$  mm。
- (4) 处理后产品表面呈银灰色、光亮状,可不经清洗、喷丸工序。
- (5) 在低压和高温状态下,渗碳过程可大大缩短,生产率高。
- (6) 辅气消耗量大为减少,可降低成本,低压渗碳的成本是可控气氛炉的 1/2 或 1/3。
- (7) 无火帘,无排气口,无油烟。加热室采用冷壁型炉体设计,对环境影响小,是环保型热处理设备。
- (8) 对不同的产品及不同热处理方法适应面广,非常灵活,每个渗碳室相当于一台多用炉。
- (9) 低压真空渗碳加高压气淬,可实现真正意义上的在线生产。
- (10) 设备设计非常紧凑,占地面积少。

### 2. 低压真空渗碳 Infracarb Process 原理

低压真空渗碳实际上是在低压(压强一般 $\leq 3$  kPa)真空状态下,通过多次强渗(通入渗碳介质)+扩散(通入氮气)与一个集中扩散过程,以达到零件渗层深度要求的工艺过程,其控制方法为“饱和值调整法”。即在强渗期使奥氏体固溶碳饱和,在扩散期固溶的碳向内部扩散到目标的要求值,通过调整渗碳、扩散时间比,达到控制表面碳浓度和渗碳层深度的目的。

某公司 Infracarb Process 工艺中利用真空渗碳的特点,采用 Mini 强渗(强渗时间细分)+扩散脉冲的方法,可以使零件不同位置处(曲率差异)的渗层深度均匀性得到明显改善,过程如图 2-45 所示。其原理为每一个强渗+扩散脉冲 Mini 为数个小脉冲,每个小脉冲的渗碳时间为小于 100 s,一般取 50 s,小脉冲之间间隔时间一般为 10 s。其过程为渗碳介质的抽出过程即抽真空。通过这一 Mini 过程提高所有部位的活性,从而提高零件各个部位的渗碳均匀性。

### 3. 低压真空渗碳 Infracarb Process 工艺

低压真空渗碳一般渗碳压强为 500~1 500 Pa,常用压强为 800 Pa 左右。Infracarb Process 低压真空渗碳软件主要输入工艺参数,包括渗碳温度、被渗工件原始碳浓度、渗碳后表面饱和碳浓度、扩散后表面碳浓度、最终表面碳浓度和介质在工件表面的富化率。渗碳介质一般用  $C_3H_8$  或  $C_2H_2$ 。

强渗结束后表面饱和碳浓度可以按照 Fe-C 平衡相图设定,采用  $C_2H_2$  渗碳可按图 2-46 获得。扩散结束表面碳浓度的设定为 0.65%~0.80%,过高的表面碳浓度将会导致表面过高的残留奥氏体和不良的碳化物形态;过低的表面碳浓度则不利于表面硬度和表面耐磨性的提高。

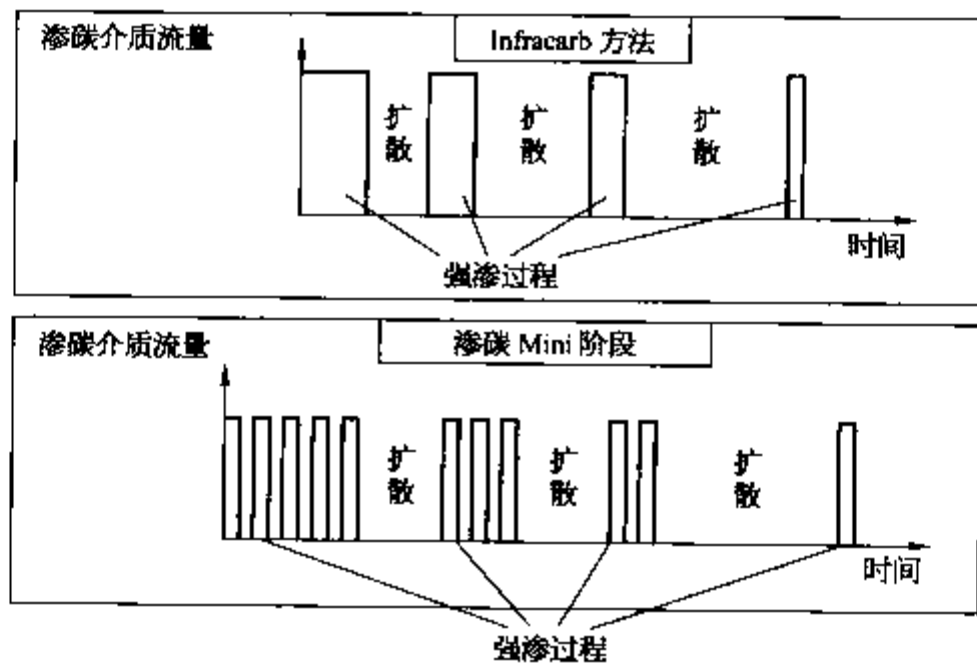


图 2-45 Infracarb Process 低压真空渗碳强渗+扩散 Mini 过程示意图

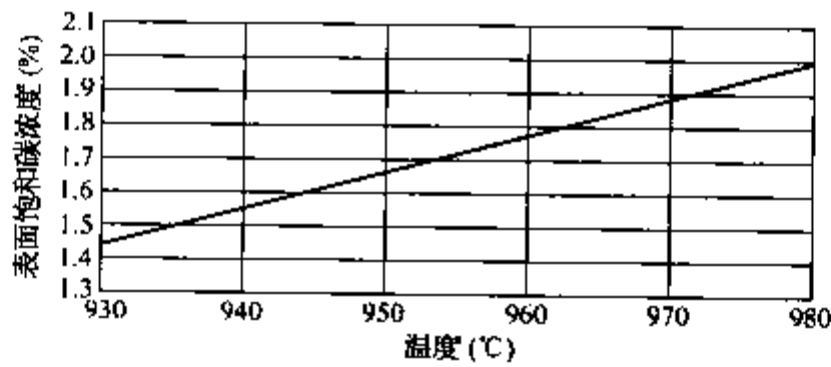


图 2-46 采用 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 低压真空渗碳表面饱和碳浓度与渗碳温度的关系

$F$  值与渗碳介质流量：低压真空渗碳过程中，零件表面的富碳能力可以用单位时间内单位面积表面吸附的碳量(介质富化率) $F$ 表示，即零件表面的碳传递系数或称表面的富化率。

$$F = Dp \times \frac{3600}{t \times a} \text{ [mg/(h} \cdot \text{cm}^2)]$$

式中  $Dp$ ——零件渗碳前后质量的变化(g)；  
 $t$ ——C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>通入的总时间(s)；  
 $a$ ——处理的零件总面积(m<sup>2</sup>)。

图 2-47 为采用 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 渗碳时  $F$  与渗碳温度的关系。

低压真空渗碳时，C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>的流量一般选用 2 500~3 500 L/h，C<sub>3</sub>H<sub>2</sub>的流量选用 3 500~4 500 L/h，过高的流量将会产生大量焦油。

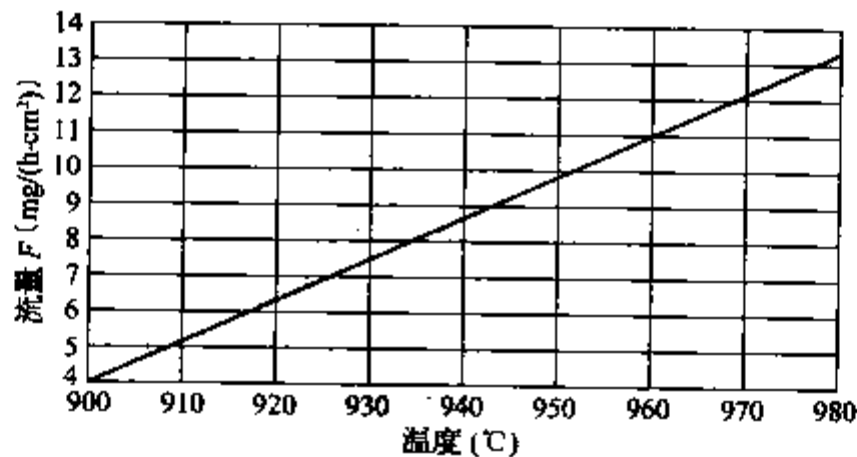


图 2-47 采用 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 低压渗碳  $F$  与渗碳温度的关系

4. 常用低压真空渗碳工艺实例——齿轮

尺寸(mm): 齿顶圆直径  $\phi 156$ 、内孔  $\phi 60.3$ 、齿宽 58、模数 4.5 mm。

材料: 8620H。

热处理技术要求: 表面硬度 58~63HRC, 半齿高心部硬度 30~45HRC, 非马氏体组织  $\leq 0.02$  mm, 齿面硬化层 513HV 为 0.84~1.34 mm(轮齿中截面), 孔经磨后硬化层 513HV  $\geq 0.67$  mm(孔径中截面)。

热处理设备: 采用 ECM 真空渗碳炉, 空冷后在 IPSEN 公司连续炉中淬火及回火。

渗碳工艺: 采用两种真空渗碳工艺进行试验并与多用炉渗碳工艺比较。

真空渗碳工艺 B: 渗碳示意图见图 2-48。

采用 ECM 真空炉低压渗碳, 空冷后在连续炉淬火回火。低压真空渗碳的压强(600~1 000 Pa), 通过多次强渗(通入丙烷)+扩散(通入氮气)与一个集中扩散过程。

真空渗碳工艺 C: 在工艺 B 基础上, 改进渗碳工艺, 采用 Mini 强渗+扩散脉冲的方法。其示意图见图 2-49。每个小脉冲渗碳时间 50~150 s, 小脉冲之间的间隔为 10 s 的扩散段(实际为抽真空段)。

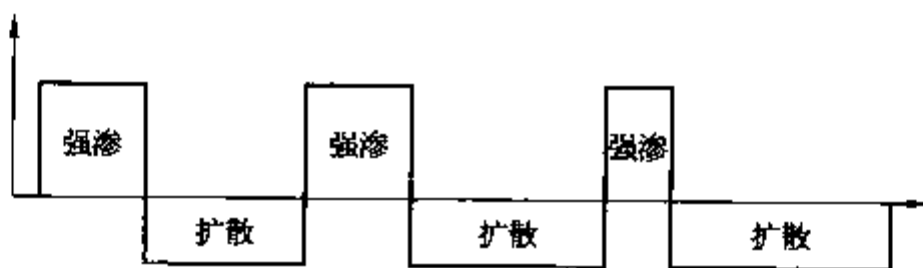


图 2-48 工艺 B 渗碳示意图

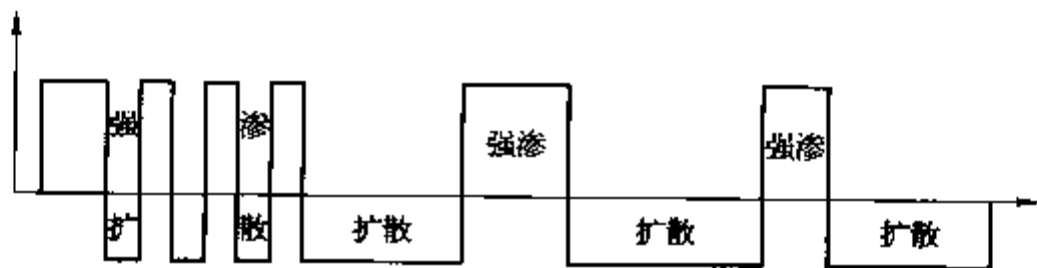


图 2-49 工艺 C 渗碳示意图

渗碳工艺 A: 采用多用炉渗碳、淬火、回火的工艺, 尽量改善孔径渗碳和淬火条件, 提高孔径的硬化层深度; 采用 950℃ 高温加热、淬火前 30 min 以 0.1 m<sup>3</sup>/h 速度通入氨气。以改善非马氏体及内氧化组织。

三种工艺比较见表 2-47, 从表可见, 真空低压渗碳可有效减小零件各部位之间的渗碳层差异, 较大地降低非马氏体及内氧化组织。采用 Mini 技术(工艺 C)后, 提高产品内孔渗层, 孔径与齿面硬化层之差减少到 0.3 mm 以内。

表 2-47 齿轮试验后硬度金相结果

使用工艺	表面硬度 HRC	心部硬度 HRC	齿面硬化层 513HV1(mm)	内孔硬化 513HV1(mm)	齿面与内孔硬化层差(mm)	非马氏体组织 $\leq 0.02$ mm
工艺 A	60~61	38~39	1.27	0.75	-0.52	0.025
工艺 B	61~62	39~40	1.26	0.87	-0.39	<0.01
工艺 C	61~62	39~40	1.31	1.04	-0.27	<0.01

(三) AvaC 乙炔低压渗碳

1. 乙炔低压渗碳的优点

(1) 用 AvaC 乙炔低压渗碳工艺, 小孔、盲孔均可均匀渗碳。

对带有  $\phi 3$  mm、长 90 mm 的盲孔, 外径为  $\phi 14$  mm 的 16MnCr5 圆形试样(图 2-50)进行渗碳试验。在 900℃(400 Pa 压强)强渗 10 min 后, 在 0.2 MPa 氮气中快冷, 并在 860℃ 重新加热, 于 0.5 MPa 氮气中淬火。然

后切开圆形试样,测量盲孔从孔口到不同深度的表面硬度。

采用不同碳氢化合物气体,在  $900^{\circ}\text{C}$  渗碳 10 min 后,对该试样测量其硬度沿孔深度的变化,见图 2-51。由图可见,丙烷及乙烯的渗碳能力只在沿盲孔深度 6 mm 以内有所作用,而超出深度 27 mm 处则完全未被渗碳。

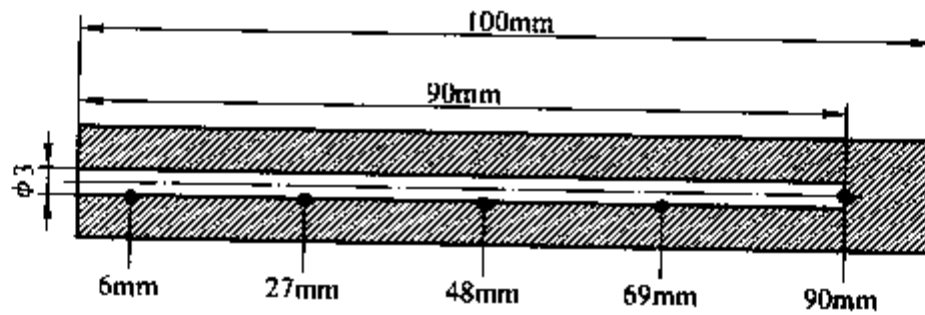


图 2-50 16MnCr5 试样盲孔图

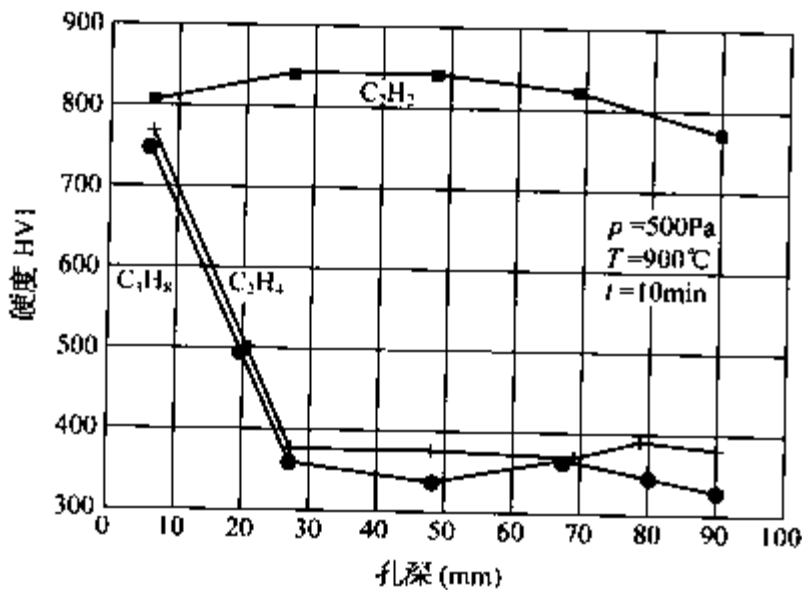


图 2-51 采用不同碳氢化合物气体,对直径为 3 mm、深 90 mm 盲孔试样在  $900^{\circ}\text{C}$  渗碳 10 min 后,测量其硬度沿孔深度的变化情况

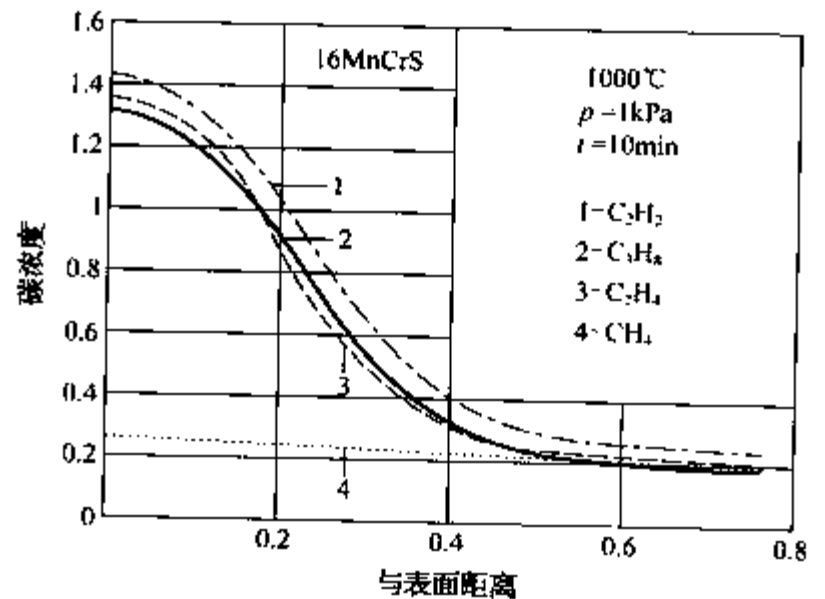


图 2-52 16MnCr5 用各种碳氢化合物气体在  $1000^{\circ}\text{C}$  (1 kPa) 渗碳所得到的碳浓度分布曲线

(2) 乙炔有很高的碳势及高的渗碳能力,即使在高于 1 kPa 的压强下渗碳也如此。乙炔在低压渗碳炉内不产生炭黑和焦油。

(3) 乙炔渗碳具有最高的表面碳含量及最深的渗层深度,用 16MnCr5 圆扁平试样在  $1000^{\circ}\text{C}$  压强 1 kPa 时渗碳 10 min,随后直接在 0.2 MPa 的氮气中快冷。采用甲烷、丙烷、乙烯和乙炔四种碳氢化合物作为渗碳剂,所得碳浓度分布曲线如图 2-52。由图可见,甲烷在  $1000^{\circ}\text{C}$  基本上没有碳输送能力,丙烷及乙烯产生相同的渗碳结果,乙炔显示了最高表面碳含量及最深的渗层深度。

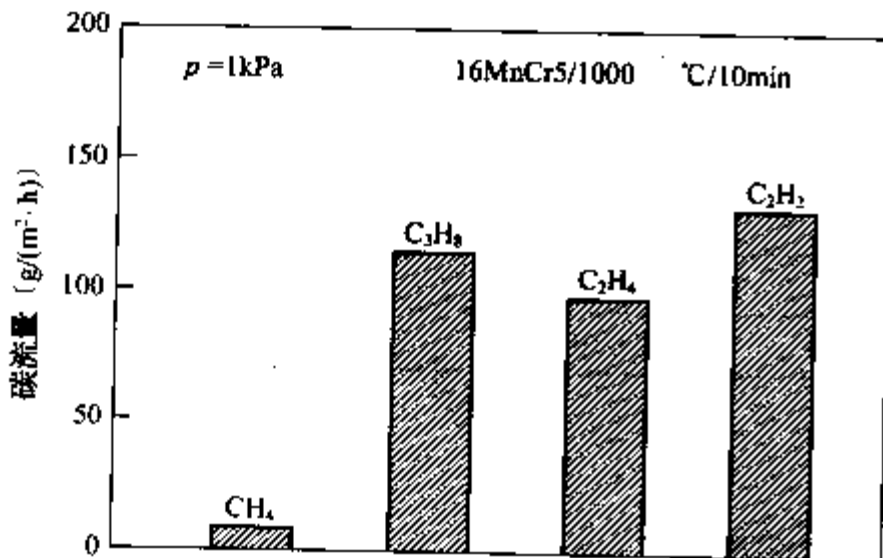


图 2-53 16MnCr5 用各种碳氢化合物气体在  $1000^{\circ}\text{C}$  (1 kPa) 渗碳 10 min 的碳流量值

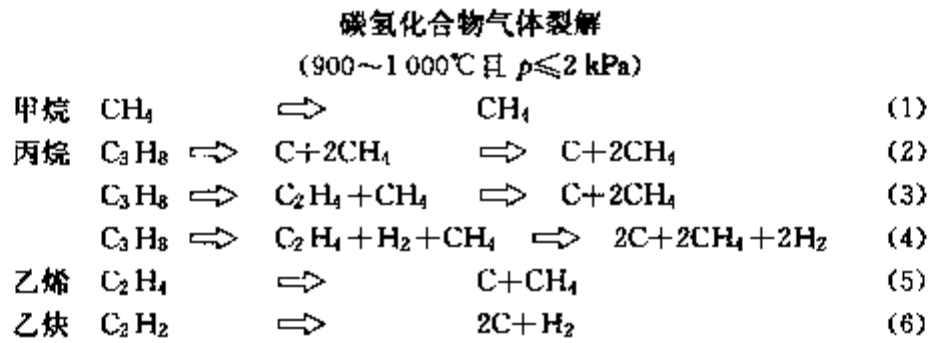
(4) 乙炔的碳流量值最高。16MnCr5 材料用各种碳氢化合物气体在  $1000^{\circ}\text{C}$  (1 kPa) 渗碳 10 min 的碳流量值如图 2-53。从图中表明,甲烷的碳流量是极小的,在  $2 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  范围。丙烷和乙烯显示相同的碳流量在  $120 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  和  $130 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。乙炔的碳流量最大,近似  $150 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

(5) 渗碳层组织完全没有晶间氧化,渗层非常均匀,工件变形小。

(6) 产品完全清洁光亮,省去了后清洗工序,排出的气体仅仅为少量的氢气。

## 2. 乙炔低压渗碳时渗碳气体的分析

真空渗碳时,可以用高纯度的天然气( $\text{CH}_4$ 为主)、丙烷和乙炔作为渗碳气源,直接通入负压真空炉内进行渗碳。在  $900\sim 1000^\circ\text{C}$  范围及压强低于  $2\text{ kPa}$  时,可能发生的分解反应如下所示:



由反应式可见,在温度  $900\sim 1000^\circ\text{C}$ 、压力低于  $2\text{ kPa}$  情况下,甲烷基本上不分解,无渗碳能力,相当于保护气氛。在  $1000^\circ\text{C}$  以上温度进行真空渗碳时,可以采用甲烷,但甲烷分解不完全,易产生炭黑。丙烷在温度高于  $600^\circ\text{C}$  时,容易分解,基本上分解成碳、氢和甲烷。由于分解非常迅速,无需触媒来催化其分解,甚至会在装料周围的空间分解,从而在加热室内产生炭黑以及在炉子冷的区域,如内壁及真空泵管道上生成焦油。为此,通过采用特别的喷嘴,脉冲供应丙烷气体以及增加丙烷气体的流速来改善碳的均匀传输。乙炔( $\text{C}_2\text{H}_2$ )只是在与金属表面接触时分解,因此解决了密集装料、大批量装料以及小直径深盲孔零件的均匀渗碳问题。同时,几乎完全避免了像丙烷渗碳而引起的生成炭黑及焦油的问题。

## 3. 乙炔低压渗碳的程序

零件装料后抽真空至低压  $10\text{ Pa}$  的真空状态;加热循环开始,零件预热和加热;达到渗碳温度开始向炉内充入乙炔,直至炉压达  $10\sim 1000\text{ Pa}$  之间,第一阶段渗碳开始;乙炔渗碳周期如图 2-54,该图显示了一个典型的温度和压力的时间循环曲线。碳的转换非常迅速,在几分钟内碳在奥氏体中的溶解度就已经达到饱和,第一阶段渗碳即结束,停止供气并将炉内抽真空,这时传输的碳不断向材料内部扩散,表面的碳含量不断降低,根据所给渗碳深度,继续进行渗碳和扩散程序,一旦达到渗碳深度及表面碳量,就进行淬火。

## 4. 乙炔低压渗碳工艺控制

乙炔低压渗碳的控制是通过控制一系列的物理参数来实现的,如温度、气流速度、气压及渗碳和扩散工序的次数和持续时间。

在数学模型(如 AvaC 专家模拟软件)模拟计算和乙炔低压渗碳实际经验的基础上,可确定在不同的渗碳温度下取得的特定的渗碳深度和必要的时间,如图 2-55。

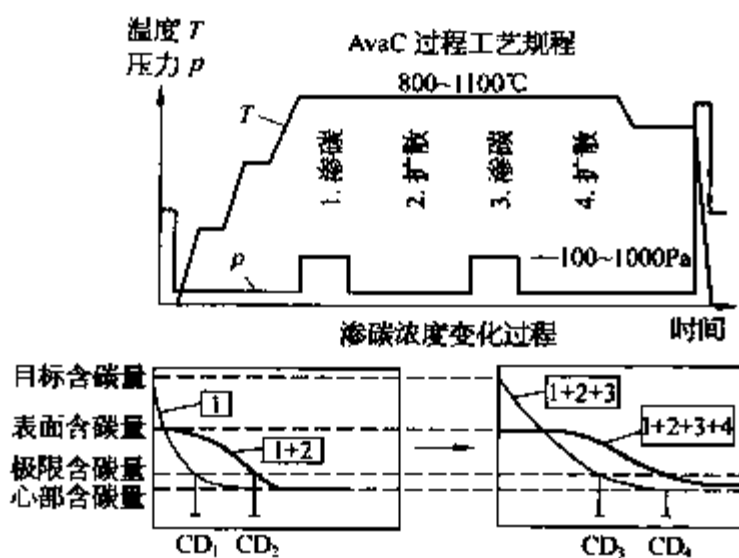


图 2-54 乙炔渗碳周期

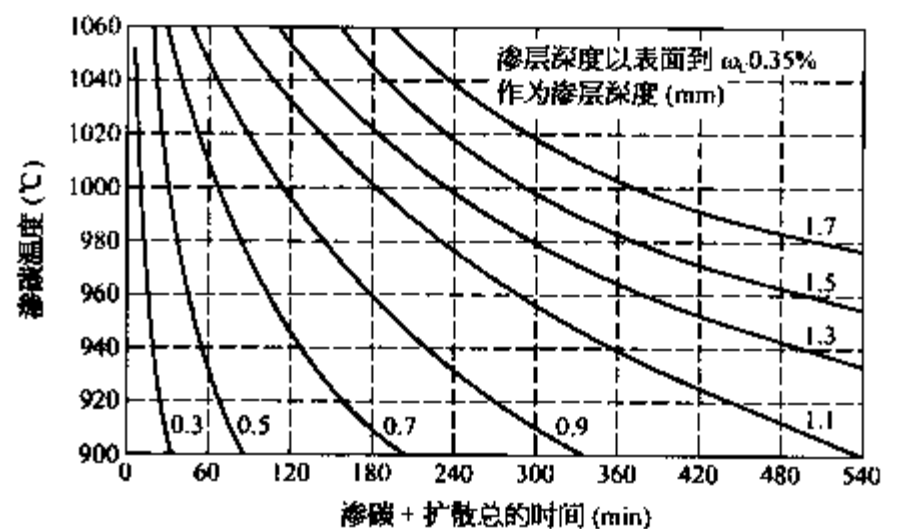


图 2-55 AvaC 乙炔低压渗碳工艺的渗碳温度、时间和渗碳层深度的相互关系

### 第三节 真空热处理炉

#### 一、真空热处理炉的分类及功率确定

##### 1. 分类

真空热处理炉是实现真空热处理工艺最主要的设备。真空热处理炉的种类很多,一般按以下几种特征进行分类,见表 2-48。

表 2-48 真空热处理炉的分类

分类方法	名称
按真空度分类	低真空热处理炉( $133\sim 10^{-1}\text{Pa}$ ),高真空热处理炉( $10^{-2}\sim 10^{-4}\text{Pa}$ ),超高真空热处理炉( $<10^{-4}\text{Pa}$ )
按加热源性质分类	电阻加热真空热处理炉,感应加热真空热处理炉,电子束加热真空热处理炉,等离子加热真空热处理炉,燃气加热真空热处理炉
按工作温度分类	低温真空热处理炉( $<700^{\circ}\text{C}$ ),中温真空热处理炉( $700\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ),高温真空热处理炉( $>1000^{\circ}\text{C}$ )
按作业性质分类	周期式作业真空热处理炉,连续式作业真空热处理炉
按用途分类	真空退火炉,真空淬火炉,真空回火炉,真空渗碳炉,真空钎焊炉,真空烧结炉

##### 2. 真空热处理炉功率的确定

为了提高真空热处理炉的生产能力和工时利用率,炉子必须具有足够的功率。确定炉子功率的方法有面积负荷法、容积负荷法、类比法和热平衡计算法等。

1) 面积负荷法 炉膛内表面积上布置的功率大,炉温就高;反之亦然。一般推荐估算值见表 2-49。此功率估算用于外热式真空退火炉较多。

表 2-49 面积负荷法确定功率

炉温( $^{\circ}\text{C}$ )	1200	1000	700	400
功率密度( $\text{kW}/\text{m}^2$ )	15~20	10~15	5~10	4~7

2) 容积负荷法 主要根据炉子容积的大小和炉温来估算炉子的总功率。估算公式:

$$P_{\text{总}} = K \times \sqrt[3]{V^2}$$

式中  $V$ ——炉膛的有效容积( $\text{m}^3$ );

$K$ ——系数,随炉内温度及炉型而变( $\text{kW}/\text{m}^3$ ),见表 2-50(卧式炉  $K$  值取上限,立式炉  $K$  值取下限);

$P_{\text{总}}$ ——总功率( $\text{kW}$ )。

表 2-50 容积负荷法确定炉子功率的系数  $K$  值

炉子温度( $^{\circ}\text{C}$ )	1200	1000	700	400
系数 $K$ 值( $\text{kW}/\text{m}^3$ )	100~150	75~100	50~75	35~50

##### 3) 类比法估算真空电阻炉的功率

即先参考查找一些同类型的设备,比照其温度、功率、容积、负荷大小参数来估算要设计炉子的功率。本方法比热平衡计算法简单得多,但需通过实践不断验证与修改。

按真空热处理炉的结构和加热方式分,基本上可以归纳为两大类:一类是外热式真空热处理炉,也称热壁炉;另一类是内热式真空热处理炉,也称冷壁炉,如图 2-56 所示。

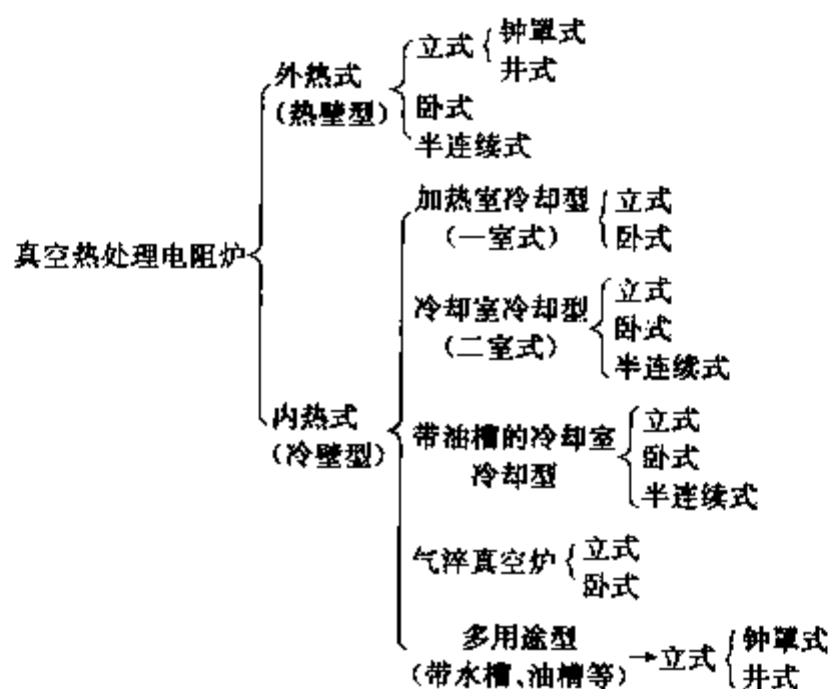


图 2-56 真空热处理电阻炉分类

## 二、真空热处理炉的主要结构

真空热处理炉通常由炉壳、电热元件、隔热屏、真空隔热门、工件传送机构、淬火油槽、气冷装置、炉床等主要部件组成。

### (一) 炉壳

真空热处理炉的炉壳是将工作空间与外界隔绝的密封容器,同时又是炉子各部件安装的基础件。炉壳作为薄壳受压容器,在工作过程中又受到很大的负荷。所以,炉壳应具有足够的机械强度和稳定性,以防止受力受热后产生变形和破坏。

炉壳设计要点:

(1) 炉壳结构设计要求合理完整,加工安装方便。工作时炉壳不允许变形。根据真空热处理炉的特点,一般采用水冷却型式。水冷却装置有两种型式,一种是在炉壳外焊上水冷却管,另一种是炉壳外焊上水冷却套。水套与炉壳间间隙:

小电炉(圆筒内径  $\phi 400 \sim 1\,000$  mm)为 15~20 mm;

大炉子(圆筒内径  $\phi 1\,100 \sim 3\,200$  mm)为 30~40 mm。

(2) 为使炉壳具有一定的强度、减少焊缝、节约材料,炉壳应尽可能制成圆筒形。炉壳钢板厚度应根据容器的公称直径、长度与直径之比及受压情况,通过机械强度计算。正压炉按压力容器进行计算。

(3) 炉壳材料:真空炉壳体一般采用金属轧制板制成,通常壳体材料采用低碳钢、低合金钢。对要求真空度较高,高温或耐腐蚀的真空炉可采用 12Cr18Ni9 不锈钢板。不锈钢板维修保养方便,真空度也易抽得高,但成本高。用普通钢板经喷砂抛光后涂耐热(180~200℃)的环氧树脂涂料或有机硅耐热漆,或用镀铬喷铝和复合钢板的办法也可达到降低成本的目的。

(4) 炉壳上应尽量少开孔或不开孔。焊缝的总长度应尽可能短,以减少真空泄漏的机会。

(5) 炉壳底和盖,对直径较小的,可做成平底、平盖;直径较大时,宜采用椭圆形、蝶形或球形封头。

(6) 炉壳加工完成后,需作水压检漏。对大的真空容器,可以在水夹层处先用压缩空气泵漏,在焊缝处涂肥皂沫进行初步检漏,再在水夹层处抽真空,用氦质谱仪进行检漏。

### (二) 加热器

加热器是真空热处理炉的重要部件,它决定了炉子的工作能力及其寿命。加热器把导入炉内的电能转变成热能,保证炉子的空间达到预定的温度。加热器由电热元件组成。



1. 内热式真空热处理炉加热器与一般空气电阻炉的工作条件比较

(1) 真空炉的电热元件是通过辐射向工件传热,低温区温差较大。

(2) 加热元件在真空炉内真空或惰性气体保护状态下工作,无需对加热元件有抗氧化的要求。

(3) 电热元件在真空炉内比其他空气炉容易挥发,而且随着电热元件温度的升高,其蒸汽压随之增加,挥发愈严重,会影响电热元件的使用寿命。真空会给电热元件带来不利的影响。

2. 电热材料选用的原则

(1) 根据真空热处理炉的最高使用温度决定。一般电热元件的工作温度比炉子最高使用温度高100~200℃。

炉子的最高使用温度低于1000℃,一般可选用镍铬合金或铁铬铝合金;炉子的最高使用温度低于1200℃,选用铁铬铝合金;高于1200℃,选用钼、钨、钽纯金属或石墨元件。

(2) 根据炉子结构特点选择。如炉子以处理黑色金属为主,宜选用石墨元件。

(3) 以处理精密合金、微碳材料为主时,宜选用钼等纯金属作为加热元件为好。

(4) 从资源及经济角度考虑,选用石墨元件、铁铬铝等作为加热元件为宜。

3. 电热材料应具备的性能

(1) 较高的电阻率。当电阻值与截面积一定时,电阻率愈大,则所需材料的长度愈短,不仅可以节约材料,而且便于安装布置。

(2) 较小的电阻温度系数。即电阻值不随温度的变化而有较大的变化,从而使电热元件在不同温度上所产生的功率差别不大,从而保持比较稳定的功率。

(3) 足够的机械强度。使电热元件在高温下能正常工作,少变形或倒塌。

(4) 热膨胀系数要小。使电热元件在高温时伸长少,不易损坏。

(5) 材料化学稳定性好。在高温下应不与炉内的气氛和炉衬发生化学反应。

(6) 抗氧化性好,加工性能要好。

4. 常用电热材料及其性能

常用真空炉加热元件的材料如图2-57所示。

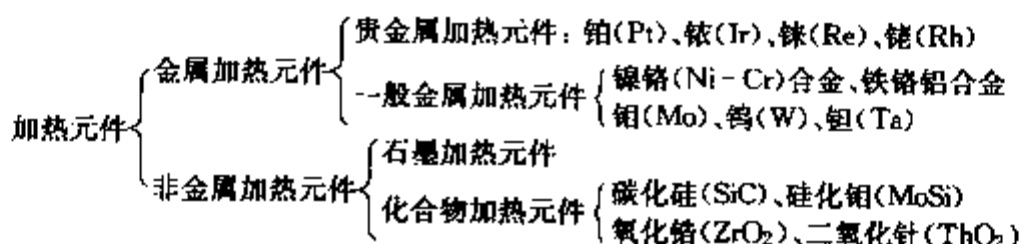


图2-57 真空炉加热元件的材料

(1) 合金电热材料。常用的合金电热材料有镍铬合金和铁铬铝合金,性能见表2-51。其特点是电阻率较大,电阻温度系数较小,在加热过程中功率稳定,耐热性好。但铬元素的蒸汽压较高,容易挥发。一般使用在低真空热处理炉上。

表2-51 常用合金电热材料的性能

合金	最高使用温度(℃)	正常工作温度(℃)	电阻率 20℃ (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	电阻温度系数(℃ <sup>-1</sup> )	熔点(℃)	热胀系数 (10 <sup>-6</sup> /℃)	主要化学成分 (质量分数,%)	应用范围 (℃)
Cr15Ni60	1000	900~950	1.10	14×10 <sup>-5</sup>	1390	13 20~1000℃	Cr 15~18 Ni 55~61	炉温<950
Cr20Ni80	1100	1000~1050	1.11	8.5×10 <sup>-5</sup>	1400	14 20~1000℃	Cr 20~23 Ni 75~78	炉温<1050
0Cr13Al6Mo2	1200	1050~1100	1.375	7.25×10 <sup>-5</sup>	1500	15.6 20~1000℃	Cr 12~14 Al 5~7 Mo 1.5~2.5	炉温<1000

(续表)

合金	最高使用温度(°C)	正常工作温度(°C)	电阻率 20°C ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	电阻温度系数( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	熔点(°C)	热胀系数 ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	主要化学成分 (质量分数,%)	应用范围 (°C)
0Cr25Al5	1 250	1 050~1 200	1.4~1.45	$(3\sim4) \times 10^{-5}$	1 500	16 20~1 000°C	Cr 23~27 Al 4.5~6.5	炉温< 1 100
0Cr27Al7Mo2	1 400	1 200~1 300	1.50	$-0.65 \times 10^{-5}$	1 520	16.6 20~1 000°C	Cr 27 Al 6.5 Mo 2	炉温< 1 300

(2) 纯金属电热材料。纯金属电热材料主要有钨、钨、钼等,其性能见表 2-52。纯金属材料的特点是熔点高;抗氧化性差,只能在真空或保护气氛中使用;电阻率小,电阻温度系数大。因而,随温度升高,炉子功率变化大,一般为了稳定功率,必须采用调压变压器进行调节。材料价格贵。

表 2-52 高温加热元件材料性能

性能	测量单位	钨	钨	钼
熔点	°C	2 660	3 410	3 030
比热容(20°C)	J/(kg·K)	$272 \times 10^3$	$138.2 \times 10^3$	$150.7 \times 10^3$
热膨系数(20°C)	$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	5.3	4.4	6.6
热导率	W/(m·K)	154.9	129.8	54.4
蒸发速度 1 530°C 1 730°C 1 930°C 2 130°C 2 330°C 2 530°C	mg/(cm <sup>2</sup> ·h)	$3.1 \times 10^{-4}$ $3.6 \times 10^{-2}$ 180	$3.1 \times 10^{-10}$ $5.3 \times 10^{-8}$ $7.5 \times 10^{-6}$ $4.6 \times 10^{-4}$ $1.4 \times 10^{-2}$ $2.7 \times 10^{-1}$	$5.9 \times 10^{-6}$ $3.5 \times 10^{-4}$ $1.1 \times 10^{-2}$ $2 \times 10^{-1}$ 25
可塑性		很好	好	优良
最高工作温度	°C	1 800	2 400	2 200
电阻率 20°C 1 000°C 1 500°C 2 000°C	$\mu\Omega \cdot \text{cm}$	5 27 43 60	5.5 33 50 66	12.5 54 72 87
表面负荷(<1 800°C,连续使用)	W/cm <sup>2</sup>	10~20	10~20	10~20
表面负荷(>1 800°C,短时使用)	W/cm <sup>2</sup>	20~40	20~40	20~40

钨和钨在高温会与绝缘物起化学反应,形成低熔点的合金,使电热元件的寿命迅速降低,限制了它们的使用温度。

(3) 非金属材料有碳化硅、硅化钨和石墨。碳化硅的粘结剂在真空下会分解,硅化钨在真空下超过1 300°C会软化。所以,真空热处理炉很少采用这两种材料。

石墨电热元件的主要性能见表 2-53。石墨的膨胀系数小,加工性能好,耐高温,耐急冷急热性好。随温度的提高,其机械强度也提高。在 2 500°C时,石墨的强度几乎比室温提高一倍。但在高温下,石墨与氧亲和力很强,高于 600°C时会发生激烈氧化。石墨只能在真空及保护气氛下使用。石墨在 2 400°C时会迅速蒸发,而在  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  Pa 时,可工作到 2 200°C,在氮气、氩气和氦气中可工作到 3 000°C。近代,中等真空度的中温和高温炉(工作温度低于 2 000°C)的加热元件多采用石墨及其制品。

表 2-53 石墨电热元件的主要性质

性能	石墨电极	德国西格利石墨电极	CFC 碳纤维石墨电极 (CC1501G)
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.2	1.53~1.6	1.4~1.45
空隙率(%)	22~26		20~25
抗弯强度(MPa)	8~13	11~13.5	210~250
抗压强度(MPa)	17~22		
抗拉强度(MPa)			260~330
电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	6~10	7.5~9	25~30
线胀系数( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	3~4	0.8~1.2	4~7.8
比热容(kJ/kg)	0.63		
热导率[W/(m·°C)]	34.88~104.65	140~170	(2.5~7)/(18~21)
饱和蒸汽压(Pa)	$1.3 \times 10^{-4}$ (2000°C)		
允许的单位表面功率(W/m <sup>2</sup> )	30~40		
黑度	0.95		
弹性模量(MPa)	电极石墨: 824/753.7 <sup>①</sup> 优质石墨: 808/984 <sup>①</sup> 高纯石墨: 800/980 <sup>①</sup>		

注: ① 分子——垂直轴线, 分母——平行轴线。

人造纤维(直径 8  $\mu\text{m}$ )织物经 2760°C 石墨化处理可得到高纯度的石墨布、石墨带(宽 50~80 mm), 是理想的加热元件。石墨布热惯性小, 加热快, 冷却也快, 耐高温, 不变形, 耐热冲击性好, 辐射面积大, 辐射效率高, 便于加工, 基本特性稳定。因此, 石墨布是真空热处理炉的理想电热材料, 已得到广泛的应用。石墨纤维布、带的性能及规格见表 2-54、表 2-55。

表 2-54 石墨纤维布性能

抗拉强度 纵面	碳素	石墨化程度	电阻(每厘米宽, 每厘米长的平均数)	厚度(mm)	纤维直径
5.488 N/cm <sup>2</sup>	$\geq 99.99\%$	40%~50%	室温 0.18 $\Omega$	0.70~0.90	8~10 $\mu\text{m}$

表 2-55 石墨纤维带发热体的规格和性能

尺寸	规格	性能	
厚度(mm)	0.5~1.5	使用温度(°C)	<2800
宽度(mm)	30~150	密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.7~1.8
连续长度(m)	<100	表面负荷(W/cm <sup>2</sup> )	<35
		抗拉强度(N/cm <sup>2</sup> )	>1470

### 5. 电热元件的表面负荷及寿命

(1) 电热元件的表面负荷。表面负荷是电热元件单位面积上所发出的电功率。表面负荷过高, 电热元件使用寿命显著降低; 表面负荷过低, 会增加电热材料的消耗。所以表面负荷是一台真空热处理炉设计合理与否的重要指标。在选取表面负荷时应考虑如下几种情况: 当炉内有腐蚀性气体, 电热体工作温度又比较高, 更换电热元件比较困难; 被处理工件材料黑度小, 对热射线吸收率小, 使加热元件工作条件变坏的情况下表面负荷

取低值。为加速传热或炉内有强制通风时表面负荷取高值。带状电热元件比线状电热元件的表面负荷高30%~50%。表面负荷允许值见表2-56。

表2-56 电热元件的表面负荷

材 料	表 面 负 荷 (W/cm <sup>2</sup> )							
	300℃	700℃	800℃	900℃	1000℃	1100℃	1200℃	1300℃
0Cr25Al5		3.0~3.7	2.6~3.0	2.1~2.6	1.6~2.0	1.2~1.5	0.8~1.0	0.5~0.7
Cr20Ni80	3.0	2.5	2.0	1.5	1.1	0.5		
Cr15Ni60	2.5	2	1.5	0.8				
Mo、W、Ta	<1800℃ >1800℃ 炉温1300℃(实际使用)		10~20 20~40 10	Mo	30	25	25	20
				Ta	40	40	40	35
				W	40	40	40	35
石 墨	40~60			40	40	40	35	

(2) 电热元件的寿命。影响加热元件寿命的主要因素:

① 使用的最高温度。电炉的加热元件温度高于工件加热温度(有时可高达100~200℃),其温差值取决于它们之间的传热条件。在确定加热材料的最高使用温度后,不应随意提高加热元件温度和长时期使用最高工作温度,否则将导致其寿命迅速降低。

② 局部过热。加热元件在制造过程中存在某些缺陷(如小裂纹,氧化膜,不纯或被破坏等),在加热过程中易造成局部过热,缩短寿命。

③ 高温强度。加热元件高温强度不够,易造成加热器损坏,或因结构设计不合理,如加热元件在高温时发生伸长、变形,接触工件而引起局部短路或打弧等。

④ 加热元件在周期性加热和冷却时,材料本身与氧化膜的胀缩不一致,常常因保护膜破坏而产生裂纹。

⑤ 炉气对加热元件寿命的影响。镍铬材料有较强耐腐蚀能力,但在含硫气氛中不稳定,铁铬铝材料在含硫气氛中高稳定,但对N<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>等气体会发生化学反应。W、Mo、石墨在空气中加热会剧烈氧化,故一定要在保护气氛或真空中使用。通常W、Mo在10<sup>-2</sup>Pa真空度以下工作,石墨在1~10<sup>-1</sup>Pa真空度下才能正常工作。

⑥ 加热元件(W、Mo、Ta)和某些高纯度耐火材料接触会发生化学反应,影响使用寿命。

⑦ 加热材料镍铬合金和铁铬铝合金中的Cr和Al都是蒸汽压较高的元素,若使用温度和真空度选择不当,上述元素就会挥发,影响加热元件的使用寿命。

通常,电热元件使用寿命不应低于6000h。

## 6. 加热元件的分组计算及接线方法

### 1) 加热元件的分组形式

(1) 确定炉子的总功率:经热平衡计算或其他方式算出炉子热损失后,再换算成炉子的功率。

$$P_{\text{总}} = KQ/860$$



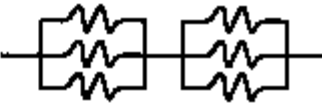



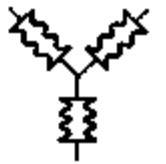



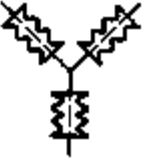

式中  $P_{\text{总}}$ ——炉子总功率(kW);

$Q$ ——热量总损失(根据工件加热所消耗的总热量)(kcal/h);

$K$ ——安全系数,连续炉1.2~1.3、周期炉1.4~1.5。

(2) 加热元件分组:根据炉子的功率大小、炉子结构、炉温均匀性和工作电压来考虑,通常30kW以下采用单相串联或并联;30~75kW采用三相星形或三相三角形接法;大于75kW时电热元件可分成两组或两组以上的三相星形或三相三角形接法。电热元件的各种接法和电工公式见表2-57,其中 $P$ ——总功率(kW), $R$ ——总电阻( $\Omega$ ), $r$ ——电热元件电阻( $\Omega$ ), $U$ ——电压(V), $m$ ——电热元件组数, $n$ ——电热元件数。

表 2-57 电热元件接线方法及电工公式

接线名称	示意图	元件数目	总电阻( $\Omega$ )	总功率(kW)
串联		$n$	$R = nr$	$P = \frac{U^2}{10^3 nr}$
并联		$n$	$R = \frac{r}{n}$	$P = \frac{nU^2}{10^3 r}$
串-并(先并后再串)		$mn$	$R = \frac{nr}{n}$	$P = \frac{nU^2}{10^3 nr}$
并-串(先串后再并)		$mn$	$R = \frac{nr}{m}$	$P = \frac{mU^2}{10^3 nr}$
星形		3	$R = r$	$P = \frac{U^2}{10^3 r}$
三角形		3	$R = \frac{r}{3}$	$P = \frac{3U^2}{10^3 r}$
双星形		6	$R = \frac{r}{2}$	$P = \frac{2U^2}{10^3 r}$
双三角形		6	$R = \frac{r}{6}$	$P = \frac{6U^2}{10^3 r}$
串-星(先串再联星)		$3n$	$R = nr$	$P = \frac{U^2}{10^3 nr}$
串-角(先串再联成角)		$3n$	$R = \frac{nr}{3}$	$P = \frac{3U^2}{10^3 nr}$
并-星(先并再联成星)		$3n$	$R = \frac{r}{n}$	$P = \frac{nU^2}{10^3 r}$
并-角(先并再联成角)		$3n$	$R = \frac{r}{3n}$	$P = \frac{3nU^2}{10^3 r}$

2) 加热体尺寸的确定及计算 确定炉子总功率及加热体的分组后,即可进行计算。已知加热器的功率  $P$ ,根据加热元件所承受的端电压,求出该温度的电阻。

$$R_T = U^2 / P \times 10^3$$

式中  $R_T$ ——工作温度时的热态电阻( $\Omega$ );

$U$ ——加热元件的端电压(V);

$P$ ——加热体功率(kW)。

$$R_T = \rho_T L / S \quad \rho_T = \rho_0 (1 + aT)$$

式中  $\rho_0$ ——20°C电阻率;

$a$ ——电阻温度系数;

$\rho_T$ ——加热体在工作温度  $T$  时电阻率;

$L$ ——计算长度(m);

$S$ ——截面积( $\text{mm}^2$ )。

最后复核表面负荷。

### 7. 电热元件的结构形式

(1) 纯金属加热器。纯金属加热器(Mo、W、Ta 材料)只能在真空或保护气氛下工作。纯金属材料的电阻温度系数很大,所以选用调压器的容量应超过炉子额定功率的 25%~30%。耐火材料在高温下导电率急剧增加,所以,纯金属加热体应尽量避免与耐火材料相接触,绝缘体应选用高纯度的氧化铝。纯金属加热器结构常用线状、棒状、筒形三种类型,一般制成鼠笼状、筒状结构,如图 2-58 所示。采用 0.2~0.3 mm 厚的 Mo 片或 Ta 片,可制成呈三相或中间开口的单相,其两端接 2~3 mm 厚的板材作为连接之用。

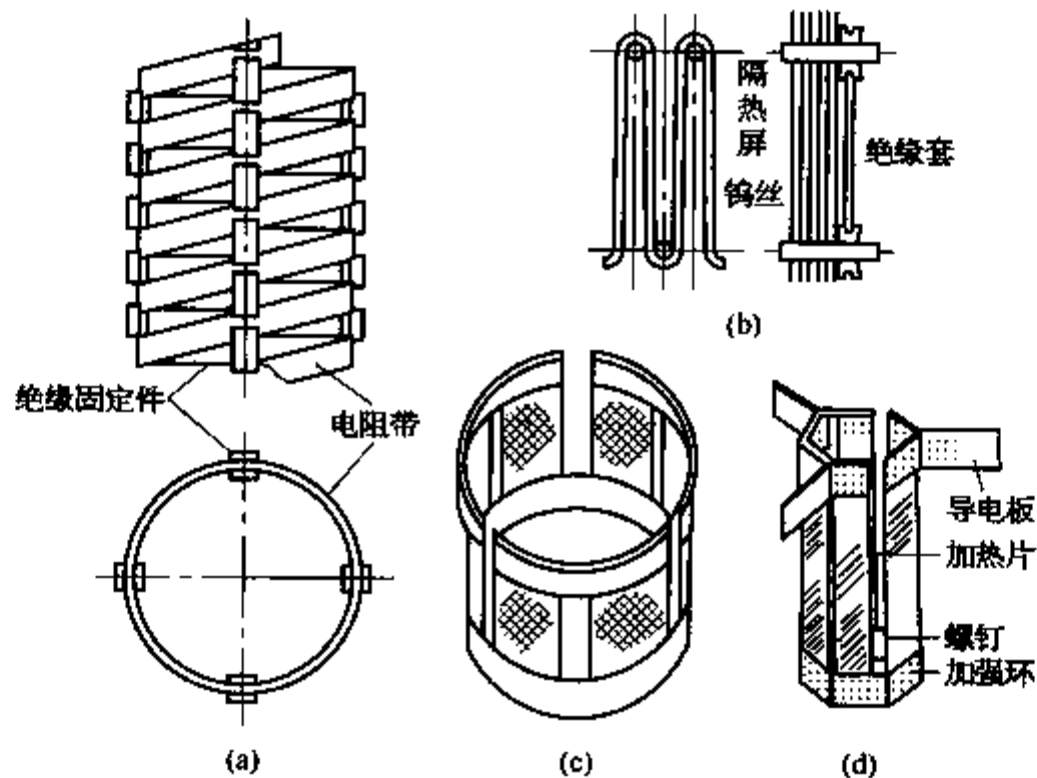


图 2-58 真空炉的金属加热元件

(a) 带状螺旋加热器; (b) 钨丝加热器; (c) 钨丝网加热器; (d) 钨丝片加热器

(2) 石墨加热器。石墨元件的电阻率相当大,可以采用较大的截面积在几十伏的低电压下工作。但其电阻温度系数较小,在 800°C 以下为负值,超过 800°C 为正值。而且,石墨加热元件在 2500°C 以下时机械强度随着温度升高而不断提高。所以,石墨元件水平放置也不会折断。石墨加热器基本上可以分为棒状、管状、板状和带状等四种类型。棒状电热元件如图 2-59。为保证螺纹连接的接触部分有可靠的导电性能,在螺纹部分涂上石墨膏(石墨膏是由石墨粉和电工漆混合制成的,呈糊状),装配完毕后在 120~140°C 中加热,保温 0.5~1 h 即可。管状石墨如图 2-60。这种结构的特点是辐射面积大、热效率高,而且克服了实心棒状电热元件在高温时易折断损坏的缺陷。

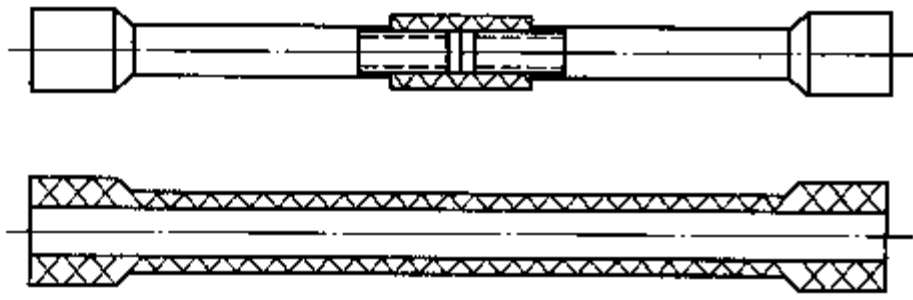


图 2-59 棒状石墨电热元件

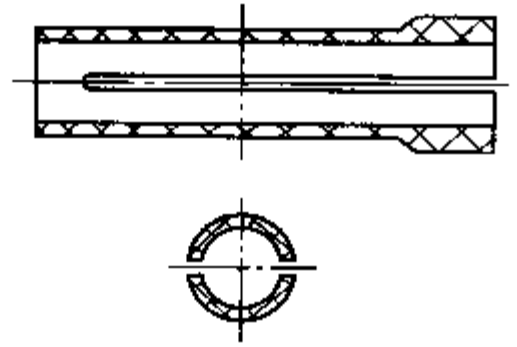


图 2-60 管状石墨电热元件

板状石墨电热元件的辐射面积比棒状电热元件大,克服了带状电热元件柔性较大,不能用于带热气流循环的缺点。带状石墨结构见图 2-61~图 2-63。

石墨布加热元件的结构简单,布置合理时炉温均匀性好,拆装也方便。

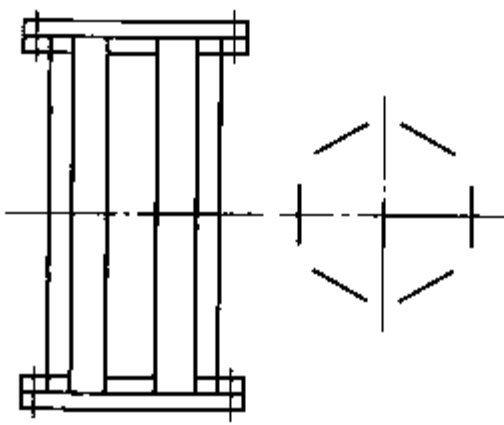


图 2-61 单相石墨布加热器

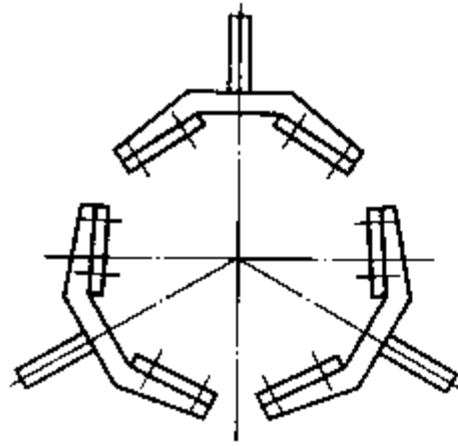


图 2-62 三相石墨布加热器

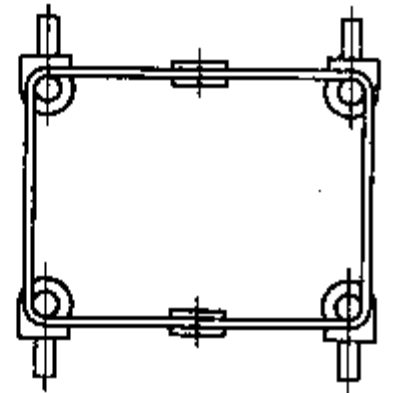


图 2-63 矩形石墨布加热器

(3) 镍铬合金和铁铬铝合金的电热元件;无论是线材和带材,其结构型式通常采用“之”字型,极少数采用螺旋式的。

### (三) 隔热屏

隔热屏的主要作用是隔热、保温和减少热损失。隔热屏的结构型式对炉子的功率和性能(如真空度、放气率等)影响很大。隔热屏除考虑其耐火度、绝热性、抗热冲击性、对冷却气体的冲刷性以及热透性外,尚要求其吸气性少、脱气性好、检修时装拆方便。一般隔热屏的表面与加热器之间的距离约 50~100 mm,加热器与工件(或料筐)之间距离 50~150 mm。隔热屏两端往往不布置加热器,温度较低,所以有效加热区距每一端约缩小 150~300 mm 或更长一点。比较大型的炉子,两端也有布置加热器。

隔热屏内部结构尺寸,即炉膛尺寸主要根据工件的形状、大小和炉子的生产量来决定。可分为全金属隔热屏和非金属隔热屏两类。其结构型式由如下几种(图 2-64):

#### 1. 全金属反辐射屏

全金属反辐射屏在高温下有较好的隔热效果,一般与金属加热元件共同使用,具有热惰性小、吸气少、抽真空快等特征。屏的材料应选择真空性能好、吸气少、不易受污染、不易蒸发、热强度高、热导率低、热反射率高的金属。一般炉温在 1100℃ 以上时,内层多用冷轧抛光的 W 片,中间层为 Mo 片,外层为 Ni 或不锈钢片。炉温低于 1000℃ 时,内层为不锈钢,其余为软钢。小功率炉子屏厚为 0.3~0.5 mm,大功率炉子应为 0.5~1 mm。层与层之间距离应尽量小,一般 5~10 mm 为宜,以避免在长期使用过程中因热应力变形而相互接触。隔热屏的层数应根据炉子功率、温度和结构条件而定,从理论上讲,层数多,热阻大,热损失也少。

炉子长期使用以后,金属屏层会氧化,可以通氢气进行还原,或进行高真空净化处理。

#### 2. 石墨毡隔热屏

石墨纤维或碳纤维是近年来发展的新品种,在真空热处理炉或惰性气体保护炉上作为隔热屏的效果极好,使用寿命也高于金属屏。而且在真空炉内石墨毡不会产生气体,价格较 W、Mo 金属材料便宜,安装简易,加工方便,有良好的绝热性能、密度小、热导率小,可以快速加热和冷却,耐热冲击性强、较高的辐射率等一系列优点。

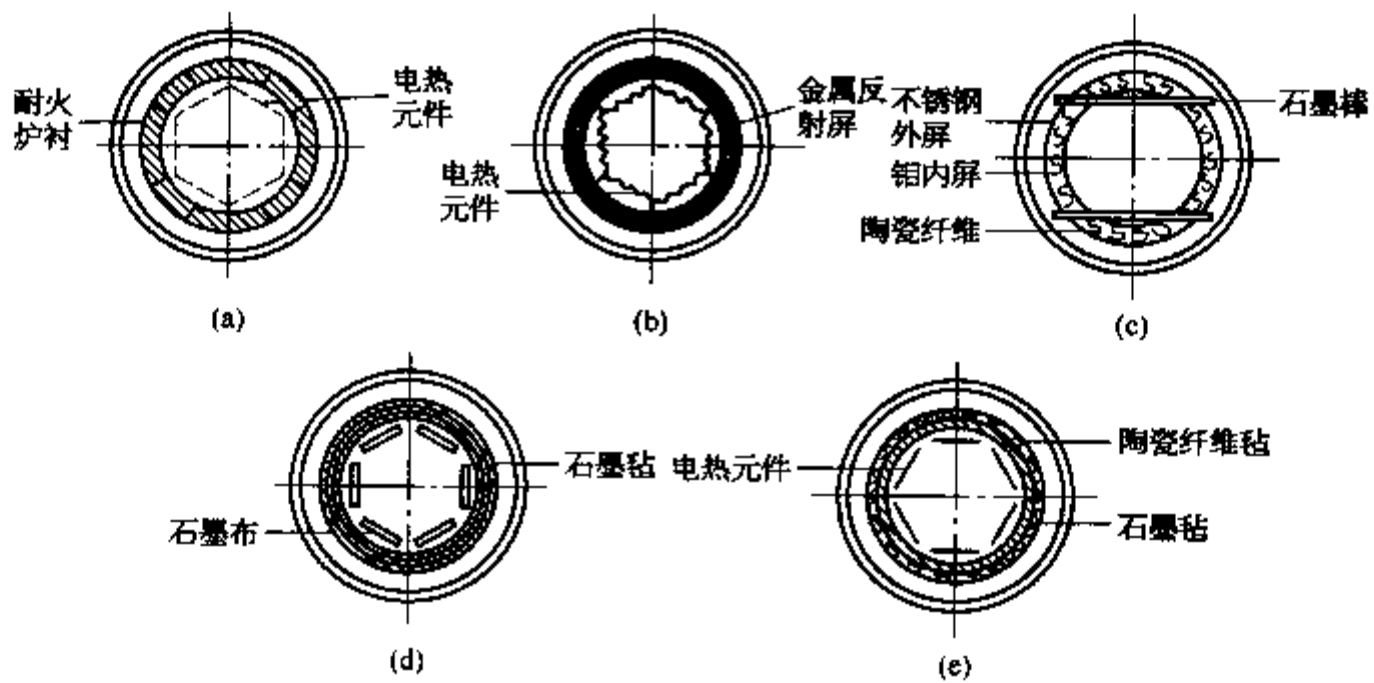


图 2-64 几种隔热屏结构型式

(a) 耐火炉衬; (b) 金属反辐射屏; (c) 夹层式结构; (d) 石墨毡隔热屏; (e) 混合毡隔热层

用石墨纤维或钼丝直接把厚度为 5~8 mm 的石墨毡 5~7 层固定在不锈钢制的骨架网上, 构成厚度为 45 mm 高效隔热屏蔽层。当内侧温度为 1320℃ 时, 外侧仅约 350℃。与金属隔热屏相比, 石墨毡隔热层制造容易, 热损失可减少 30%。隔热层使用寿命通常 5~6 年, 更换时只需换下内表面 1~2 层即可。

### 3. 夹层复合材料屏

在陶瓷纤维内外两侧衬以 Mo 片、不锈钢片的隔热屏在低真空及中真空(真空度低于  $6.7 \times 10^{-3}$  Pa) 的低温炉中得到应用, 但应根据炉子的不同工作温度选用不同的陶瓷纤维材料。陶瓷纤维的特点是热导率小、隔热效果好、重量轻、热容量小、耐急冷急热性好、化学稳定性好、绝缘性能好, 是近十几年发展起来的新型耐火隔热材料。其主要特性见表 2-58。

表 2-58 陶瓷纤维性能

性能指标		硅酸铝纤维	含铬纤维	高铝纤维	
化学成分 (wt%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43~45	50	64.74	
	SiO <sub>2</sub>	53~55	45	35.0	
	CaO	0.1~1.0	(Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 3~4.5)	0.05	
	TiO <sub>2</sub>	1.2~3.5		0.07	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2~0.3	0.01~0.08	0.12	
	MgO	微量		微量	
物理性	最高使用温度(℃)	1260	1450	1400	
	持续使用温度(℃)	950~1050	1300	1300	
	收缩率(%)	2.5~4	2.5~4	2.15~4.5	
	纤维直径(μm)	2.8~4.2	2.8~4.5	2.5~5	
	纤维长度(mm)	10~250	15~350	20~280	
能	热导率 [W/(m·K)]	550℃	8.84		
		1000℃	28.49	24.07	25.70
		1200℃		26.87	27.68
		1400℃		33.26	33.72



陶瓷纤维毡一般加入有机粘合剂压制而成,在真空加热烘炉过程中陶瓷纤维毡中的粘合剂会大量挥发,炉内和真空系统受到污染,使真空抽不上去。所以,在应用陶瓷纤维毡时,一定要选用粘合剂少或最好不加粘合剂的纤维毡。另外,陶瓷纤维使用一段时间以后会不断缩损,影响保温效果,这是陶瓷纤维的不足之处使其在真空炉中的应用受到一定限制。

#### 4. 混合毡隔热屏

混合毡隔热屏内层为石墨毡,外层为陶瓷纤维毡,这种结构具有很好的隔热效果。如内层为两层 16 mm 石墨毡,外层为 20 mm 陶瓷纤维的混合毡隔热屏,当炉内温度为 1 200℃ 时,石墨毡与陶瓷纤维交接处温度为 917℃,陶瓷纤维外表面积温度为 265℃。这种隔热屏的结构紧凑、轻巧、造价低廉,但同样有陶瓷纤维毡粘合剂影响抽真空及使用一段时间后陶瓷纤维缩损之弊。

#### 5. 耐火炉衬

耐火炉衬系使用轻质耐火砖(泡沫高铝砖)采用干砌法制成。它具有空载损失功率小(一般约占加热功率 30%~45%)、材料费用低、温度波动小等特点。但炉子升温、降温速度慢,耐火砖吸气量大,生产周期较长,适用于在 1 200℃ 以下、 $10^{-1}$  Pa 情况下进行真空退火处理的炉子。

### (四) 真空隔热闸门

真空隔热闸门是真空密封与加热室隔热合为一体的结构门,是双室式或连续式真空热处理炉的关键部件之一。真空隔热闸门的动力为气动或液压。隔热闸门结构有两种类型:闸板式和翻板式,见图 2-65、图 2-66。真空隔热闸门的作用:

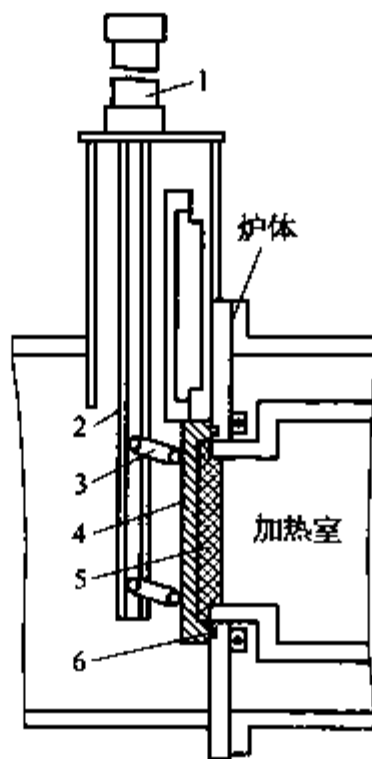


图 2-65 闸板式真空隔热门

1—油缸; 2—导向槽; 3—摇臂;  
4—密封门; 5—隔热层; 6—密封圈

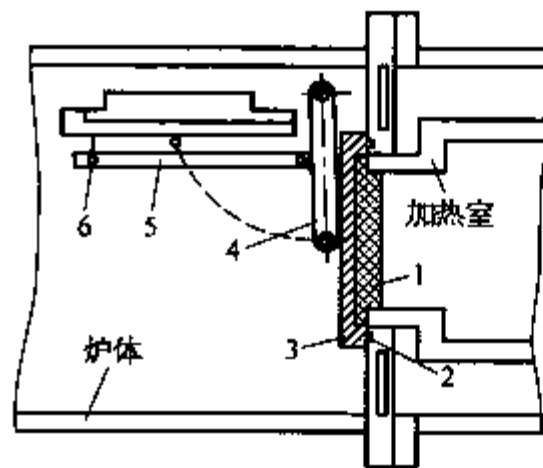


图 2-66 翻板式真空隔热门

1—隔热层; 2—密封圈; 3—密封门;  
4—摇臂; 5—滑槽; 6—滑块

(1) 减轻对加热室的污染,特别是当灼热工件油淬时产生大量的油蒸气。如无闸门加热室,污染将十分严重,有损于加热元件和绝热层的使用寿命,也影响工件的表面质量。

(2) 工件在双室气冷炉冷却时,冷却室中的隔热闸门使冷却气体不受加热室中热量的影响,因而有利于工件的快速冷却。并可节约冷却气量约 1/3。

(3) 加热室在热炉时就可打开前室门进行装料,有利于余热利用,并缩短生产周期。

(4) 油淬时可以进行半连续生产。

闸板式隔热闸门用四连杆机构原理设计制造,结构紧凑、动作可靠,压紧力大,但加工制造复杂,密封可靠性较好,启用时撞击振动较大。国内外真空热处理炉大部分采用此结构。翻板式隔热闸门由于真空密封圈(硅橡胶)离开加热室有较大距离,密封圈受热影响小、寿命长,但结构尺寸较大,整个炉体结构繁杂、尺寸大,给工

件传送结构的设计带来一定难度。其压紧力较小,密封可靠性较差。

### 三、常用真空热处理炉简介

#### (一) 外热式真空热处理炉

外热式真空热处理炉是带密封炉(马弗)罐的真空炉,其结构与普通箱式电阻炉类似,只是安放工件的炉罐抽成真空。常用外热式真空热处理炉的结构示意如图 2-67。

作为马弗罐的材料要求焊接性能好,不易产生气孔;在高温时有一定的机械强度;热胀系数小,在反复加热冷却时氧化层也不被破坏。用作马弗罐材料的最高使用温度见表 2-59。

表 2-59 马弗罐材料的最高使用温度

钢 种	最高使用温度(℃)
普通碳钢	430
5%~6% Cr 钢	650
13% Cr 钢(12Cr13, 20Cr13, ZG40Cr9Si2)	850
18% Cr~8% Ni 钢(12Cr18Ni9, 1Cr13Si2, ZG30Cr18Mn12Si2N)	900
25% Cr~20% Ni 钢 28% Cr 钢(3Cr24Ni7SiNRe, Cr25Ni20Si2, Cr25Ni35, 14Cr23Ni18, Cr18Ni25Si2)	1 100
20% Cr~80% Ni 钢	1 150
镍铬铁耐热合金铸件(不常用)	1 300

外热式真空炉结构简单,制造成本低,可由普通电炉改装而成;在炉罐内除工件以外,很少有其他构件,炉内放气的构件少,容易达到高真空;操作方便,故障少,维修也方便。其缺点是炉子加热效率低,工件加热和冷却速度慢,炉温均匀性差,炉子热容量大,热惯性大,控温困难。炉罐有部分暴露在大气下,虽有隔热屏,但热损失大,炉罐寿命低,不能实现快冷。所以,外热式真空炉一般只作为一般金属材料如紫铜、轴承钢等进行真空光亮退火以及真空渗碳、渗氮、氮碳共渗等化学热处理之用。

#### (二) 内热式真空热处理炉

内热式真空热处理炉的加热元件、隔热材料、机构及冷却系统均在带水冷夹套的双壁真空室内,其特点是炉子升温快、热惰性小,并可以根据工艺要求在炉内实现气冷、油冷、缓冷、水冷、分级等多种工艺操作;其作业环境好,自动化程度高;采用石墨材料和难熔金属作为发热元件,炉子温度可达 1 000℃ 以上。其缺点是炉子结构复杂,造价高,制造周期长。这种型式的炉子已成为现代真空热处理炉的主流,广泛应用于真空退火、高压气淬、油淬、真空回火、烧结、钎焊以及其他真空化学热处理等多种工艺。

##### 1. 真空气油淬、油淬真空热处理炉

带冷却室的真空油淬、气油淬真空热处理炉近年来发展较快,加热后的工件可以移动到冷却室进行气淬或油淬。初期的真空油淬炉仅仅局限于负压气冷油淬,随后发展到气冷压强可达 0.2 MPa 的气油淬炉,直至发展到可冷却压强到 0.6 MPa 的气油淬炉,使该类型的炉子应用范围更加扩大。

1) 真空气油淬热处理炉的结构型式 结构型式有立式的:气油淬真空热处理炉、硝盐等温分级淬火热处理炉;有卧式的:一室式、二室式、三室式真空气油淬热处理炉;二室式真空油淬热处理炉及连续式真空油淬热处理炉。各类真空气油淬热处理炉的结构示意图见图 2-68。

##### 2) 真空气油淬热处理炉的特点

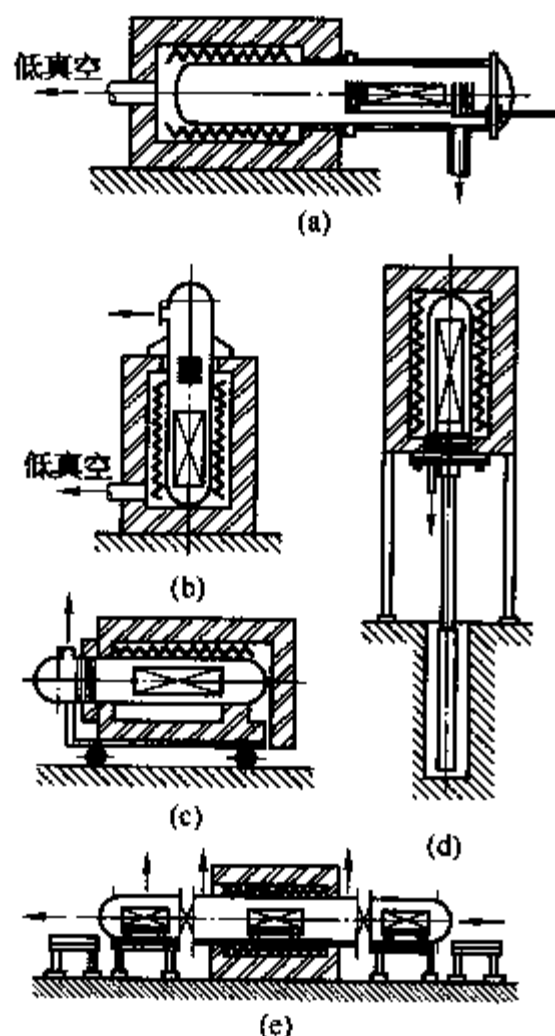


图 2-67 常用外热式真空热处理炉的结构

(a) 箱式炉; (b) 井式炉; (c) 台车式炉;  
(d) 升降式炉; (e) 卧式半连续作业炉

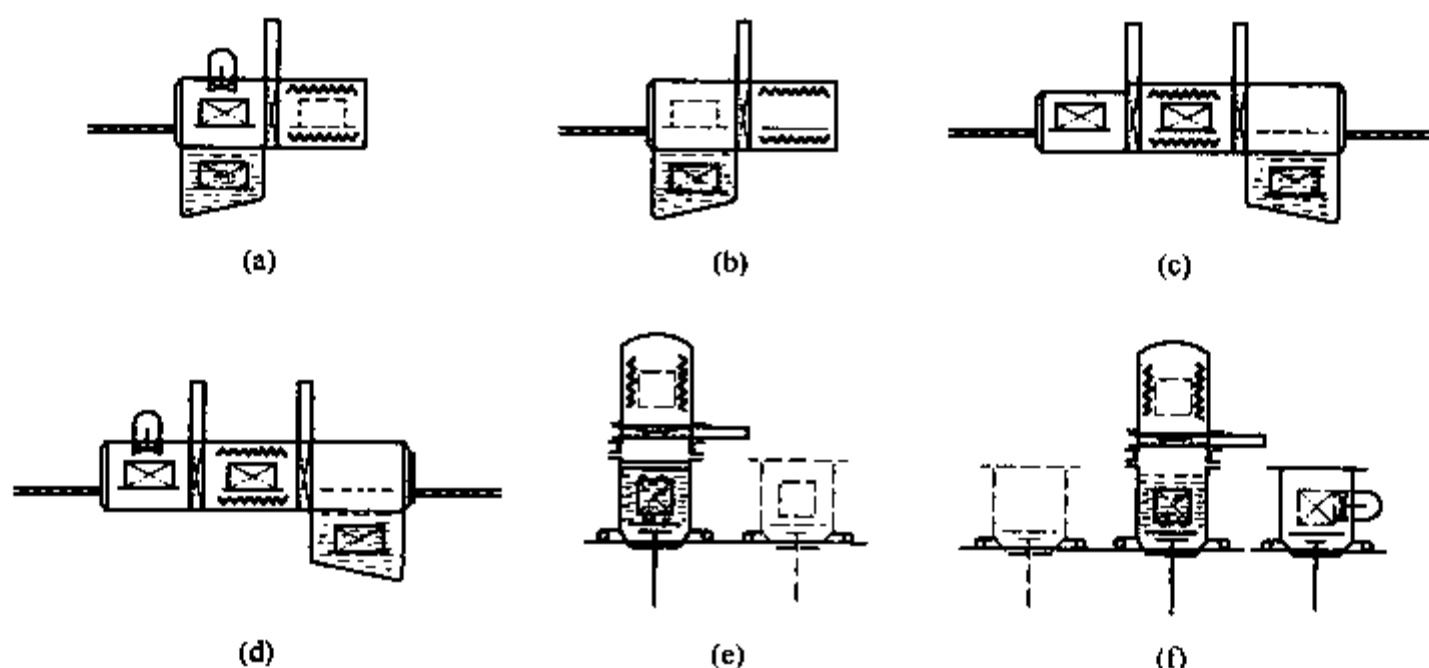


图 2-68 各类真空气油淬热处理炉结构示意图

(a) 二室式气油淬炉; (b) 二室式油淬炉; (c) 三室式油淬炉;  
(d) 三室式气油淬炉; (e) 立式油淬炉; (f) 立式气油淬炉

(1) 适用范围比较广、用途多,碳素工具钢、低合金钢、高合金钢材料均可在这种类型的炉子中热处理,特别适用于中小型、表面质量要求较高、变形要求不严格的工件。

(2) 工件的冷却速度较快。由于前室与加热室分开,中间又有隔热和隔气的热闸门,可以一边进行油淬,一边打开前室门进料,进行半连续生产。

(3) 炉子结构比较复杂,造价较高,机械动作多,易出故障。这就阻碍了真空油淬炉的进一步发展。特别是对以处理高合金钢或高速钢为主的零件,往往采用单室的高压气淬炉或高流率气淬真空炉。

### 3) 典型真空气油淬热处理炉

(1) WZ 系列双室油气真空淬火炉(国产),其技术指标见表 2-60。

表 2-60 WZ 系列双室油气淬火炉主要技术指标

设备型号	有效加热尺寸 (mm)	额定装炉量 (kg/次)	加热功率 (kW)	油加热功率 (kW)	整机总功率 (kW)	冷却水用量 (m <sup>3</sup> /h)	总质量 (t)	占地面积 (m <sup>2</sup> )
WZC-10	100×150×100	5	10	4	<15	0.5	~1.5	~3
WZC-20A	200×300×150	20	20	6	<25	1.5	~3	~7
WZC-30G	300×450×350	60	40	16	<50	2.5	~6.2	~10
WZC-45	450×670×300	120	60	32	<100	3	~8	~16
WZC-60A	600×900×400	210	100	48	<170	5	~15	~25

注:最高温度 1 300℃;炉温均匀性±5℃;加热室极限真空度 $<6.6 \sim 6.6 \times 10^{-3}$  Pa;压升率 0.66 Pa/h;淬火充气压力  $8.7 \times 10^4$  Pa。

(2) VOGQ<sub>3</sub> 系列三室油淬高压气冷真空炉(国产),其技术指标见表 2-61。

表 2-61 VOGQ<sub>3</sub> 系列三室油淬高压气冷真空炉主要技术指标

型号	有效工作尺寸 (mm)	装炉量 (kg)	加热功率 (kW)	最高温度 (℃)	温度均匀性 (℃)	极限真空度 (Pa)	压升率 (Pa/h)	气冷压强 (MPa)
VOGQ <sub>3</sub> -65	600×400×400	150	65	1 320	±5	$4 \times 10^{-1}$ 或 $4 \times 10^{-3}$	0.65	0.6
VOGQ <sub>3</sub> -100	900×600×450	300	100	1 320	±5	$4 \times 10^{-1}$ 或 $4 \times 10^{-3}$	0.65	0.6

(3) FH.V 系列气油淬立式真空炉(国外立式),其标准性能和使用规格见表 2-62。

表 2-62 FH. V 系列气油淬真空炉标准性能和使用规格

项目/型式	FH. V-□						备注
	30	45	60	75	90	120	
均热部尺寸(mm)	300×300	450×450	600×600	750×750	900×900	1 200×1 200	φ×H
处理量(kg/次)	40	90	160	260	400	800	标准试样程度
升温时间(min)	30 以内	30 以内	30 以内	30 以内	30 以内	40 以内	从室温到 1 150℃
冷却油投入时间(s)	12 以内	12 以内	12 以内	12 以内	15 以内	15 以内	
容许漏泄量(L/s)	3	4	6	8	10	12	根据压力上升法
所需电量(kW)	49	78	125	185	241	326	交流 200~220 V 直径 φ3 mm 电热元 件平均使用电量
冷却水量(m <sup>3</sup> /h)	2.5	4	6	8.5	10	18	0.25 MPa, 30℃ 以下
压缩空气量	若干	若干	若干	若干	若干	若干	0.7 MPa
输送气体量(L/min)	1	1.5	2.2	4.5	7.2	10	N <sub>2</sub> , 标态下
冷却油量(m <sup>3</sup> )	0.5	1	2	3	4	6	油冷用
油加热器(kW)	6	8	16	24	32	48	油冷用
冷却气体量(m <sup>3</sup> /次)	1.2	1.8	3	4	6	10	N <sub>2</sub> , 标态下
安装尺寸(m)	6×5	7×6	8×7	9×8	10×9	12×10	W×L

注: 最高温度 1 350℃, 当 1 150℃ 时炉温均匀性 ±10℃ (空炉); N<sub>2</sub> 强制冷却时间为 30 min 以内 (标准试样放入从 1 150℃ 到 150℃); 空炉或脱气后最低压力 10<sup>-1</sup> Pa; 使用载气的工作压力 133~10<sup>-1</sup> Pa; 从空炉到 6.7 Pa 排气时间 10 min 以内。

(4) FH. H-□ L. H 系列油气淬真空炉 (国外卧式), 其内部结构图见图 2-69, 其产品技术性能和使用规格见表 2-63。

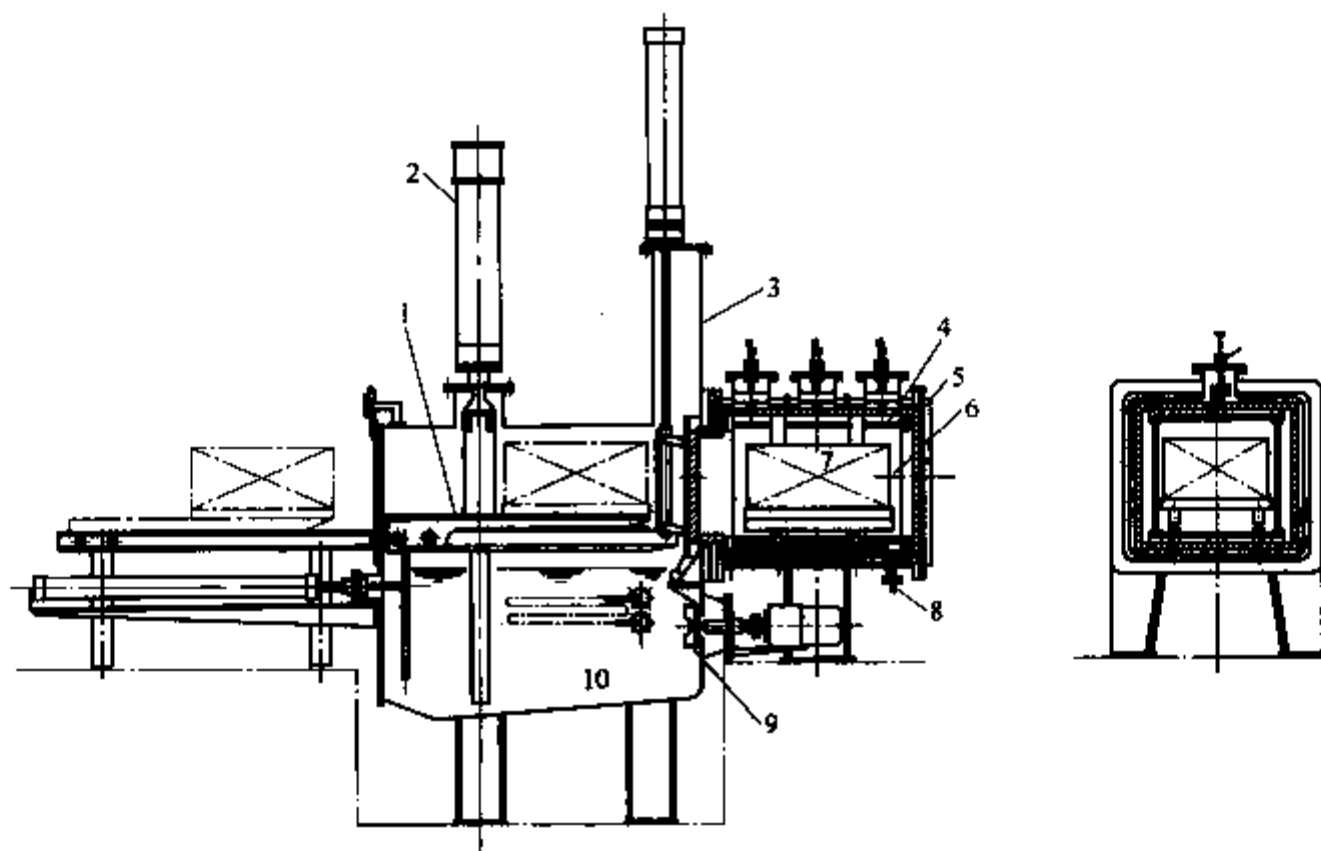


图 2-69 FH. H-□ L. H 系列内部结构图

1—叉车; 2—叉车升降用缸; 3—隔门阀; 4—电极; 5—绝热材料; 6—加热器;  
7—加热室; 8—载气导入气; 9—油搅拌用风扇; 10—油冷却室

表 2-63 FH, H-□ L, H 系列油气淬真空炉技术性能和使用规格

项目/型式		FH, H-□						备 注
		30	45	60	75	90	120	
性 能	工作室尺寸 (mm)	300×450 ×200	450×675 ×300	600×900 ×400	750×1 125 ×500	500×1 350 ×600	1 200×1 800 ×800	W×L×H
	装炉量(kg/次)	50	120	210	350	500	1 000	标准装载量
	升温时间(min)	30 以内	30 以内	30 以内	30 以内	30 以内	40 以内	室温到 1 150℃ 止
	入油时间(min)	12 以内	12 以内	12 以内	12 以内	15 以内	15 以内	从加热室到入油
	排气时间(min)	10 以内	10 以内	10 以内	10 以内	10 以内	15 以内	从空炉到 6.7 Pa 为止
	容许漏泄量(L/s)	3	4	6	8	10	12	根据压力上升法
所需电量(kW)			118	164	272	430	630	交流 200~220 V 直径 φ3 mm 的电热元件 平均使用电量
冷却水量(m <sup>3</sup> /h)			4	6	9	11	18	0.25 MPa, 30℃ 以下
压缩空气量		若干	若干	若干	若干	若干	若干	0.7 MPa
载气量(L/min)		1	1.5	2	3	4.5	6	氮气
冷却油量(m <sup>3</sup> )		0.9	1.5	2.7	5.7	8.5	12	油冷用
油加热器(kW)		9	15	24	48	72		油冷用
冷却气体量(m <sup>3</sup> /次)		1.8	2.7	4.5	6	10	18	N <sub>2</sub>
安装尺寸(m)		3.5×5	4×6	5.5×8	6×10	6.5×12	7×15	W×L

注: 最高温度 1 350℃, 当 1 150℃ 时炉温均匀性 ±10℃ (空炉); N<sub>2</sub> 强制冷却时间为 30 min 以内 (标准试样放入从 1 150℃ 到 150℃); 空炉或脱气后最低压力 10<sup>-1</sup> Pa; 使用载气的工作压力 133~10<sup>-1</sup> Pa。

## 2. 高压气淬真空处理炉

实践证明, 采用真空加热, 气体冷却比真空油淬具有更大的优越性。气淬炉结构简单, 工件在热处理过程中不需移动, 畸变小, 零件表面状态好, 不需要清洗。尤其出现高压气淬真空炉和高流率气淬真空炉, 将气淬真空炉的开发和应用推向了新的阶段。气冷压强也逐步提高。目前 0.6 MPa、1.0 MPa 的高压气淬炉已普及和应用。汽车、航空、军工行业则开始应用 2.0 MPa、4.0 MPa 的高压真空气淬炉。

### 1) 高压气淬真空炉的特点

(1) 工件气淬后表面光亮度比较好, 淬火后工件不必清洗。

(2) 高压气淬炉或高流率气淬炉多数为单室炉, 在工艺过程中工件不必移动。所以, 对大型工件及畸变要求高、形状复杂的高合金钢模具应用最为广泛。

(3) 单室气淬炉的加热元件和气体喷嘴分布均匀, 使工件加热和冷却均匀。内置式大功率风机和高效热交换器保证了冷却气体的定向有序循环流动, 使其淬火冷却能力强、工件淬火质量重现性好。

(4) 通常高压气淬炉都带有对流加热装置, 可在 850℃ 以下进行对流加热, 缩短了低温阶段预热时间, 提高了炉温均匀性和生产效率。

(5) 加热室内装有多支工件热电偶, 可以控制炉子加热和冷却。近代高压气淬炉具备分级等温冷却功能, 可实现工模具气体分级等温淬火工艺, 进一步减少了工件畸变和开裂倾向。

### 2) 典型气淬真空热处理炉

(1) WZ 系列高压气淬炉 (国产), 见表 2-64。

表 2-64 WZ 系列国产高压气淬炉主要技术指标

型号	加热区尺寸 (mm)	装炉量 (kg)	最高温度 (°C)	极限真空度 (Pa)	加热功率 (kW)	炉温均匀 (°C)	备注
WZDGQ-20	200×300×200	20	1320	$2.0 \times 10^{-1}$ 或 $4.0 \times 10^{-3}$	30	±5	气淬压强 $6.0 \times 10^5$ Pa 压升率 $6.5 \times 10^{-1}$ Pa/h
WZDGQ-30	300×500×300	50			57		
WZDGQ-45	450×670×400	200			75		
WZDGQ-60	600×900×600	400			140		
WZGQ-20	200×300×180	20	1320	$2.0 \times 10^{-1}$ 或 $4.0 \times 10^{-3}$	20	±5	气淬压强 $6.0 \times 10^5$ Pa 压升率 $6.5 \times 10^{-1}$ Pa/h
WZGQ-30	300×450×330	60			40		
WZGQ-45	450×670×400	120			70		
WZGQ-60	600×900×450	210			125		
WZJQ-20	200×300×180	20	1320	$2.0 \times 10^{-1}$ 或 $4.0 \times 10^{-3}$	20	±5	气淬压强 $2.0 \times 10^6$ Pa 压升率 $6.5 \times 10^{-1}$ Pa/h
WZJQ-30	300×450×330	60			40		
WZJQ-45	450×670×400	120			63		
WZJQ-60	600×900×450	210			100		
WZDJQ-20	200×300×200	20	1320	$2.0 \times 10^{-1}$ 或 $4.0 \times 10^{-3}$	30	±5	气淬压强 $2.0 \times 10^5$ Pa 压升率 $6.5 \times 10^{-1}$ Pa/h
WZDJQ-30	300×500×300	50			50		
WZDJQ-45	450×670×400	150			75		
WZDJQ-60	600×900×600	300			140		

(2) HZQ 系列高压气淬炉(国产),见表 2-65。

表 2-65 HZQ 系列高压气淬炉主要技术参数

型号	有效加热区尺寸 (mm)	装炉量 (kg)	最高温度 (°C)	炉温均匀性 (±°C)	极限真空度 (Pa)	压升率 (Pa/h)	加热功率 (kW)	气冷压强 (MPa)
HZQ-20	300×300×200	20	1300	5	$4.0 \times 10^{-1}$ ~ $6.6 \times 10^{-3}$	0.67	20	0.2~0.6
HZQ-50	450×300×300	100					50	
HZQ-80	600×400×400	200					80	
HZQ-150	900×600×600	500					150	
HZQ-200	1100×700×700	800					200	
HZQL-80	φ500×600	200	1300	5	$6.6 \times 10^{-3}$ ~ $4.0 \times 10^{-1}$	0.67	80	0.2~0.6
HZQL-150	φ800×900	500					150	
HZQL-200	φ1000×1100	800					200	
HZQL-300	φ1000×2000	1500					300	
HZQL-500	φ1600×2500	3000					500	
HZQ <sub>2</sub> -40	450×300×300	60	1300	5	$4.0 \times 10^{-1}$ ~ $6.6 \times 10^{-3}$	0.67	40	0.2~0.6
HZQ <sub>2</sub> -65	600×400×400	150					65	
HZQ <sub>2</sub> -120	900×600×600	300					120	

(3) HVQ 系列高压气淬炉(国产),见表 2-66。

表 2-66 HVQ 系列高压气淬炉主要技术指标

型 号	HVQ-50	HVQ-100	HVQ-160	HVQ-200	HVQ-300	12HVQ-100	12HZQ-160
有效加热区尺寸 (mm)	300×300 ×400	400×400 ×600	600×600 ×900	700×700 ×1200	900×900 ×1200	400×400 ×600	600×600 ×900
加热功率(kW)	50	100	160	200	300	100	160
装炉量(kg)	100	200	600	800	900	200	600
气冷压强(MPa)	0.7					1.2	

注:最高温度 1320℃,炉温均匀性±5℃;极限真空度  $4.0 \times 10^{-1} \sim 6.6 \times 10^{-3}$  Pa;压升率 0.7 Pa/h。

(4) H 型(或 V 型)高压气淬真空炉。

该炉为单室高压气淬真空炉(示意图见图 2-70,技术参数见表 2-67),炉室呈圆筒状,热区结构有全石墨隔热屏和全金属屏两种,最大气淬压强为 1.2 MPa,对流加热循环风扇置于炉门内壁。采用多边形石墨板加热元件呈环状分布(图 2-71),加热均匀,寿命长,石墨毡表面覆盖 CFC 碳纤维编织板(或烧结一层柔性石墨纸),不但耐高温气流冲蚀,并能保护石墨毡。气体喷嘴环绕圆周方向均匀分布。高压气淬时,内置的大功率风机和热交换器送出的冷高压氮气,通过单向开启的喷嘴从圆径向喷射工件,随后热风由回流腔壁返回,石墨喷嘴采用可单向开启的方孔形挡板式结构(图 2-72),设计简单可靠,改变了通常圆柱孔喷嘴螺纹连接方法,从而避免了在炉顶部位的喷嘴气淬时易掉落的风险。由于挡板式喷嘴只能单向开启,在对流加热时,阻止了热气流的外逸,改善了炉室气流密闭性,减少了加热时的热损失。试验证明在预热至 850℃时,比辐射加热的时间缩短了 30%,850℃保温阶段功率损耗降低 25%,而且大大改善了工件的温度均匀性,这种圆形炉室高压气淬炉有利于提高生产效率、降低能源消耗,还有利于改善工件的热应力、减少工件畸变,适用于较大尺寸工模具的热处理。

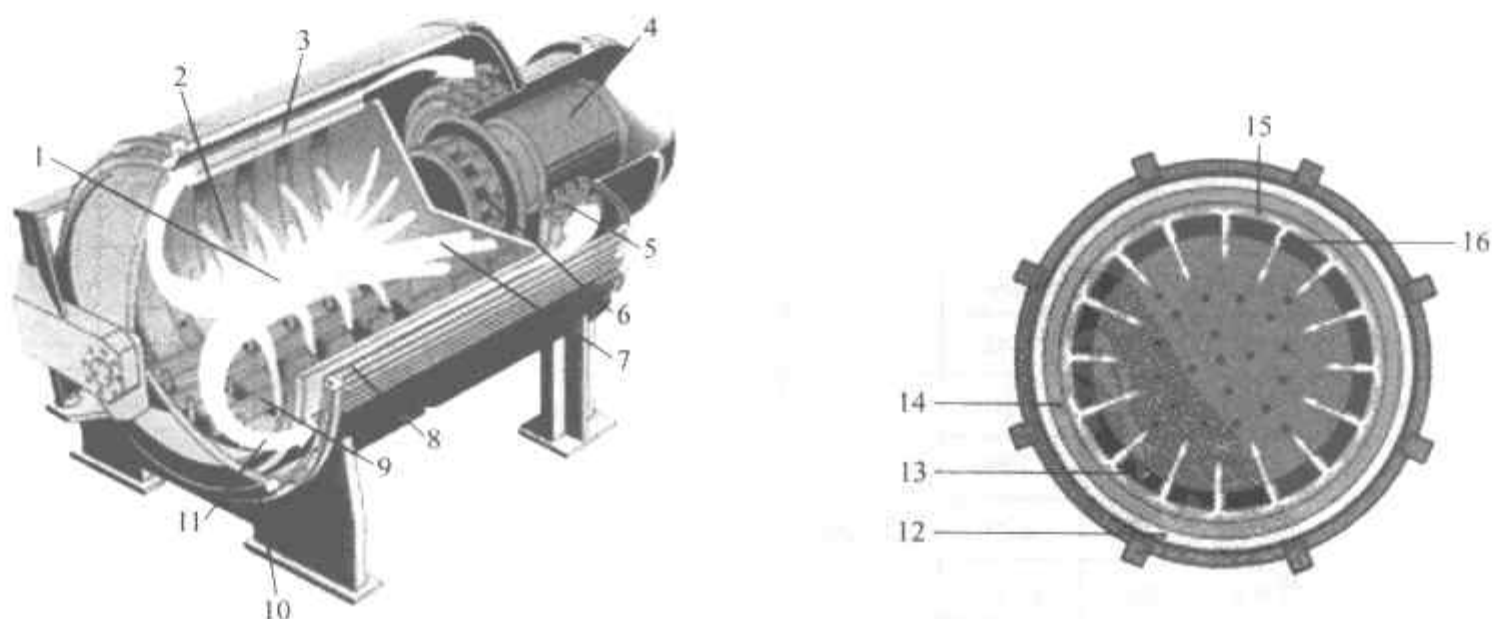


图 2-70 H 型高压气淬真空炉炉室结构示意图

1—气体分配系统; 2—石墨加热元件; 3—隔热屏; 4—风机马达; 5—热交换器;  
6—涡轮风机; 7—高速冷却气; 8—水冷套; 9—导轨; 10—炉门; 11—气体回路;  
12—水冷炉壳; 13—隔热屏; 14—气体回流; 15—气压分配器; 16—气淬喷嘴



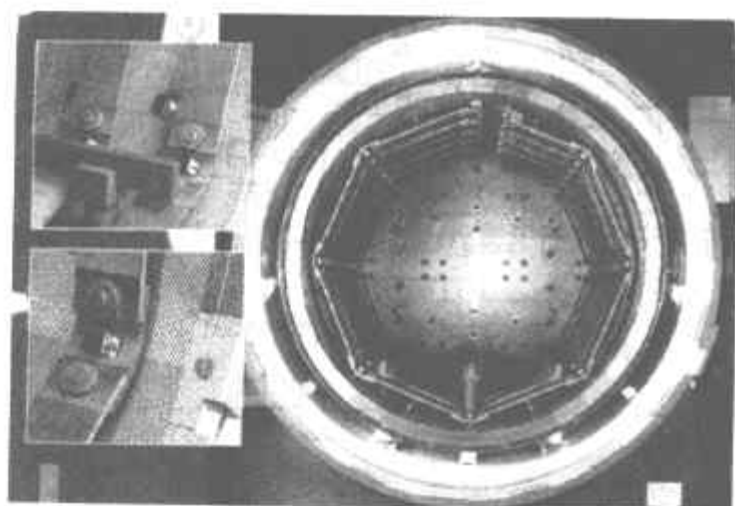


图 2-71 H型高压气淬真空炉石墨热室结构图

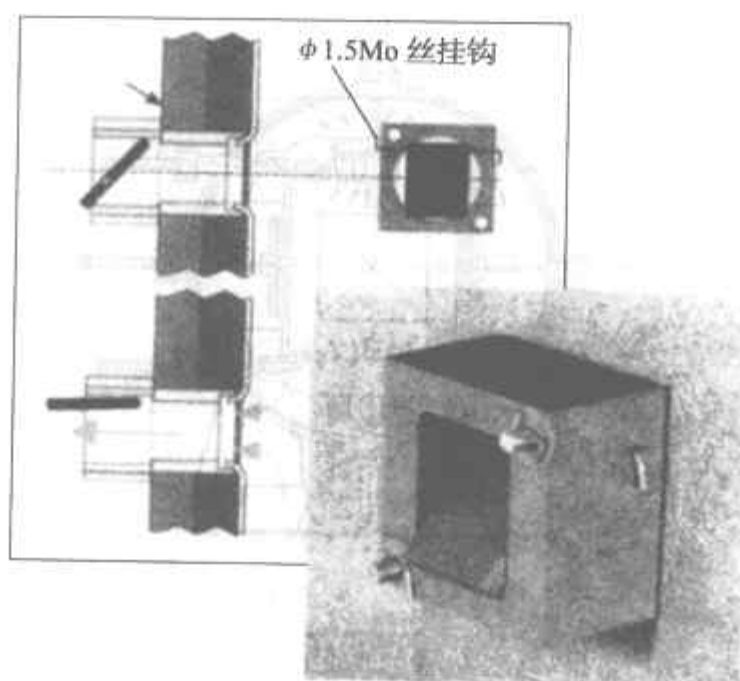


图 2-72 挡板式气体喷嘴结构

表 2-67 H型(或V型)高压气淬真空炉技术参数

型号 (卧式)	标准装料尺寸(mm) (宽×高×长)	可选装料尺寸(mm) (宽×高×长)	装炉量 (kg)	型号 (立式)	标准装料尺寸(mm) (直径×高)	装炉量 (kg)
H-2024	457×356×610	584×152×610	318	V-4854	1 219×1 372	1 361
H-3636	610×610×1 016	762×152×1 016	681	V-6060	1 524×1 524	1 815
H-4848	914×762×1 219	1 118×152×1 219	1 134	V-7272	1 829×1 829	2 268
H-4872	914×762×1 829	1 118×152×1 829	1 361	V-8472	2 134×2 134	3 630
H-6060	1 067×1 067×1 524	1 524×711×1 524	1 588	V-12096	3 048×2 438	9 072
H-6648	1 219×1 219×1 219	1 524×711×1 219	1 361			
H-6672	1 219×1 219×1 829	1 524×711×1 829	1 588			

## (5) VUTK 型高压气淬真空炉。

VUTK 型单室卧式高压气淬真空炉,炉室呈方形,该炉的炉门装有对流加热循环风扇,炉温在 850℃ 以下时可实行对流辅助加热,该炉炉室上下,左右设置了四个可以移动冷却气流盖。在高压气淬过程中可以通过控制温度或时间使气流上下或左右流动,以获得尽可能高的淬火速率。并使气流方向适应炉料和工件的几何形状,使工件气冷时更加均匀,工件变形最小。图 2-73 为该炉的结构示意图,表 2-68 为该炉的技术参数。

表 2-68 VUTK 型真空炉技术参数

基本参数	单位	标准规格型号			
		VUTK-224	VUTK-524	VUTK-1324	VUTK-40×48×40
有效工作区尺寸空间	mm	450×600×400	600×900×600	900×1 200×750	1 000×1 200×1 000
最大装炉量	kg	200	600	1 000	1 500
最大加热功率	kW	75	150	210	320
加热速度(空炉) (到 1 250℃ 时)	min	≈30	≈35	≈40	≈45

注:其他技术参数:工作温度范围 150~1 350℃,对流加热时 150~850℃,真空加热时 500~1 350℃,250℃ 以上时温度均匀性 ±5℃;工作压力:低真空时 10 Pa,高真空时 10<sup>-2</sup> Pa,对流加热时 0.12~0.2 MPa,低压渗碳时 100~1 000 Pa;极限压力:低真空时 1 Pa,高真空时 10<sup>-3</sup> Pa;最大气冷压强 0.6 MPa 或 1 MPa;抽气速度从空炉到 10<sup>-2</sup> Pa 约 20 min。



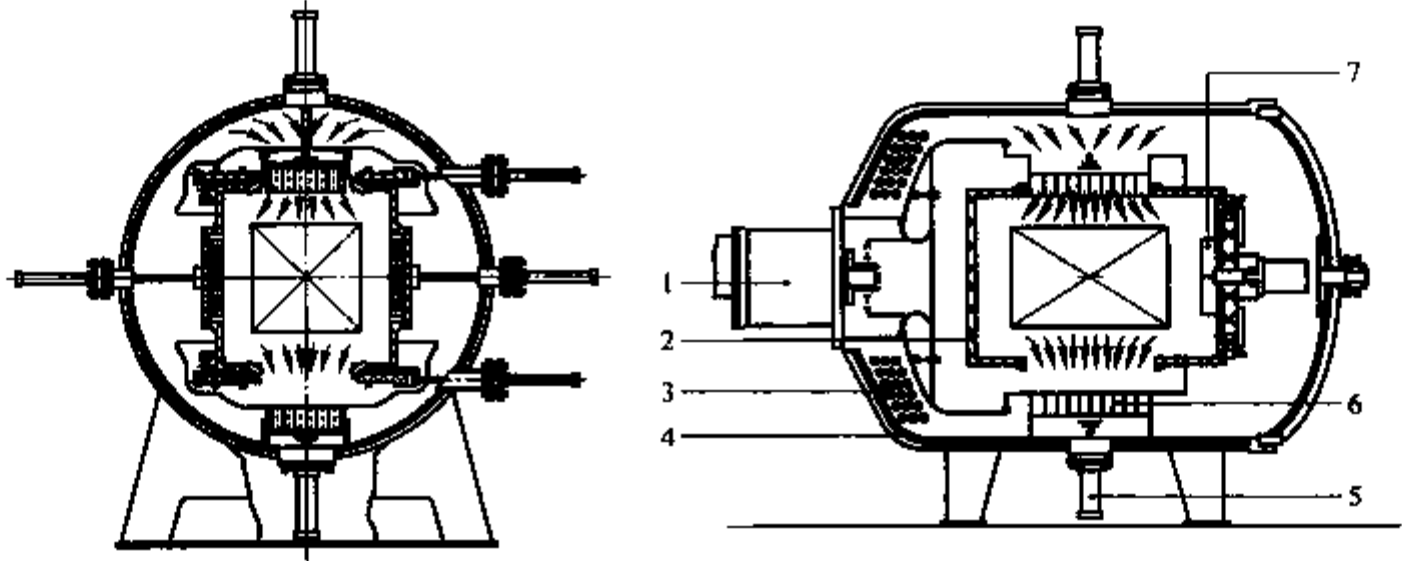


图 2-73 VUTK 型高压气淬真空炉结构示意图

1—冷却风机系统；2—隔热层；3—热交换器；4—水冷炉壳；5—气缸；6—可移动式喷嘴排；7—对流加热风机

这种方形炉室及灵活的冷却气流方式特别适合多层密装,批量生产的工件,是目前工具行业广泛应用的高压气淬炉型。

从 20 世纪 80 年代以来,国内外高压气淬真空炉技术的发展和进步是迅速而有成效的,真空气淬炉的冷却能力随气淬压力的逐步增长而提高。目前,淬火压强为 0.6~1.2 MPa 的气淬真空炉已经得到广泛应用;低温阶段对流加热技术提高了真空炉生产效率;模拟分级等温工艺的应用明显改善了气淬工件的变形;真空炉的自动化程度也日趋完美。高压气淬真空炉的这些优点已被生产实践所证明,也已成为广大热处理用户共识。因而在汽车,电子,航空,航天及工模具等行业得到广泛的应用。

就高压气淬真空炉目前所达到的水平和能力而言,其淬火变形量确实比油淬工件要小,但是,气淬工件的显微组织尚无法与油淬件媲美,特别是对特大型 H13 钢类热作模具,如质量 $\geq 1\ 000\text{ kg}$ 、有效厚度 $\geq 300\text{ mm}$ 的模具。高压气淬工件由于其心部冷速慢,显微组织尚不能令人满意,使模具的冲击韧度降低,影响到模具使用寿命。为此,国内外正不断探索适合特大型模具的热处理设备。

(6) 新型真空热处理生产线。

近年来,国外汽车行业开发了新型真空热处理生产线,该生产线采用在真空炉中加热随后转移到盐浴炉进行等温冷却的方法,生产线设备布置见图 2-74。该生产线大量用于铝合金压铸模及锻造模具,年处理能力达到 2 000 t。生产线设备组成包括:① 一台 V900 $\times$ 900 $\times$ 1 500-24R 型真空加热炉;② 燃气盐浴等温淬火槽 2 台,容积 7 m<sup>3</sup>,工作温度分别为 180~500 $^{\circ}\text{C}$ 和 500~650 $^{\circ}\text{C}$ ;③ DAC 型回火炉 2 台,也可用于氮碳共渗;④ 能自动除盐渍的热水清洗槽;⑤ 装料台;⑥ 自动装卸料装置;⑦ 计算机控制系统;⑧ 工件、料筐清洗机。

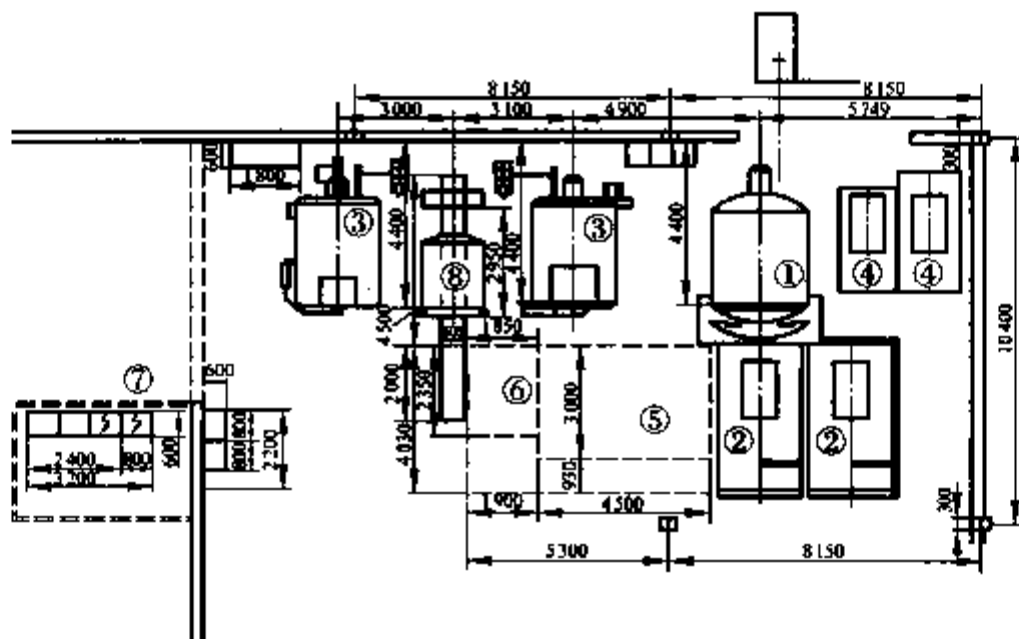


图 2-74 真空热处理生产线平面图

真空热处理炉的最大装载量为 2 t, 抽真空后工件在 0.1 MPa 氮气中加热, 加热元件为 SiC 棒, 炉室所有部件使用耐热钢及抗氧化材料, 隔热层用陶瓷纤维。这就使真空炉能在高温下快速打开, 并在  $\leq 20$  s 的时间内快速浸入等温浴槽, 同时加盖封闭冷却。图 2-75 是材料为 4Cr5MoSiV 钢、尺寸为 780 mm $\times$ 640 mm $\times$ 300 mm、单件质量为 1.2 t 的热作模具钢的热处理工艺曲线, 经处理后模具硬度 44.5~45.5HRC。图 2-76 显示了其优良的等温淬火后显微组织(针状马氏体及碳化物), 图 2-77 是模具热处理后的变形量。由图可知, 模具最大微变量 0.7 mm, 向外膨胀的变形量 0.3 mm, 这种 1.2 t 的大型压铸模的显微组织和微畸变优良的结合, 是目前国内外高压气淬炉所无法达到的。

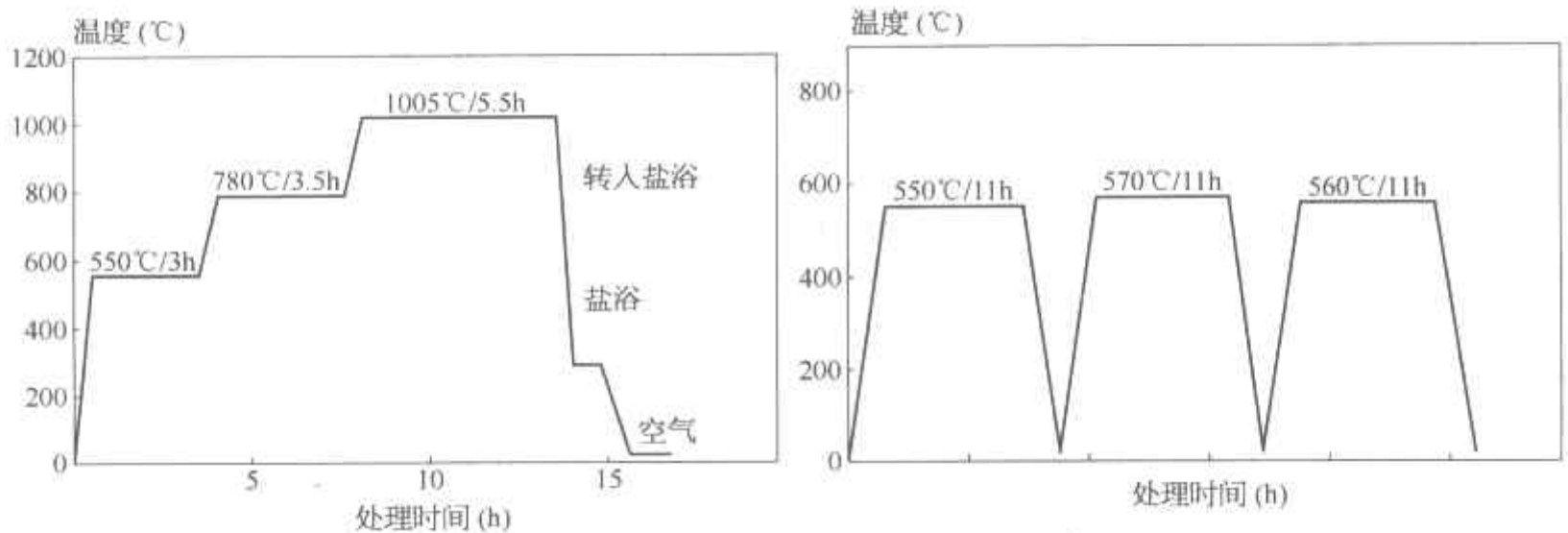


图 2-75 材料 4Cr5MoSiV 制造的模具的淬火回火工艺曲线

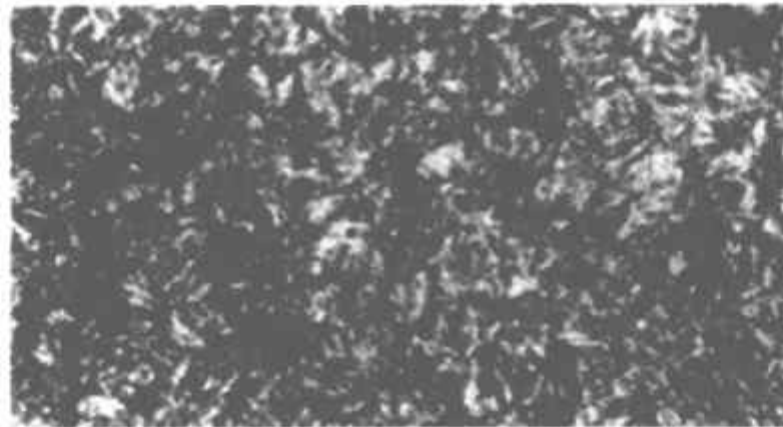


图 2-76 4Cr5MoSiV 热处理后的显微组织(针状马氏体+碳化物)

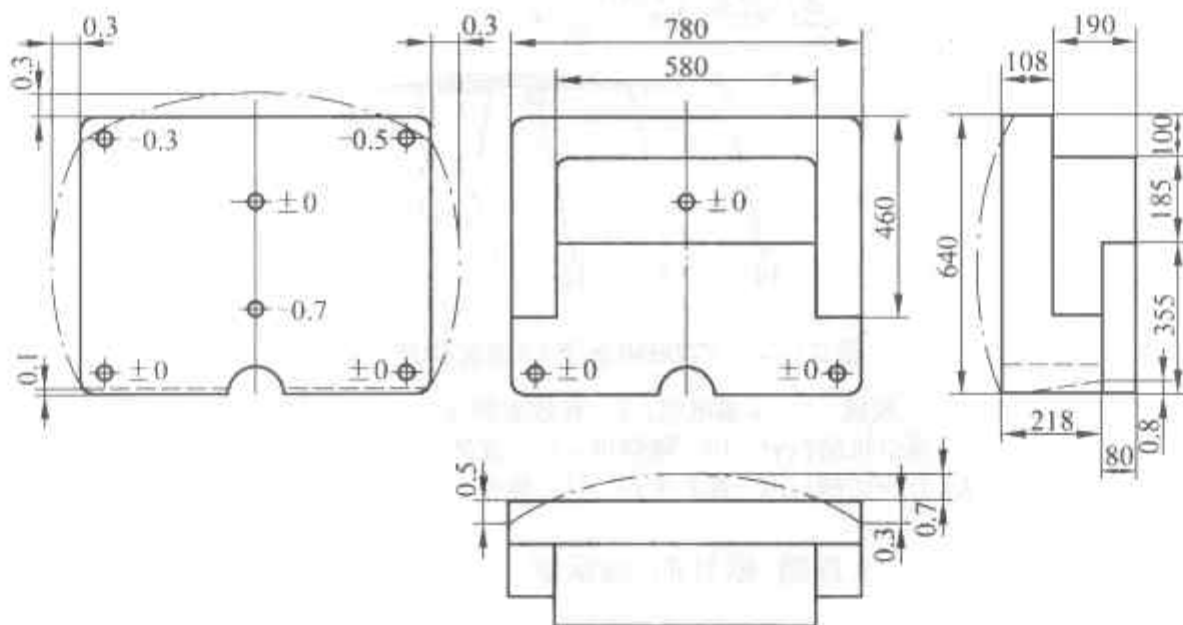


图 2-77 4Cr5MoSiV 1.2 t 压铸模在 200°C 盐浴中淬火并三次回火后的尺寸变化

### (三) 抽空炉

抽空炉是真空与可控气氛相结合的炉子,是近年发展的新型炉种,广泛地应用于渗碳、碳氮共渗、气体渗氮、真空复碳及光亮淬火回火等工艺。

抽空炉一般由单层钢板焊成,保温层采用耐火纤维,炉子热容量小,升温降温都比较快。炉体按真空炉结构设计,炉子的密封性好。一般可控气氛炉用可控气氛赶气,换气时间很长(经过5次全容积换气,炉内气氛含氧量才降低到0.146%),第一次开炉需一个班的时间(约8h)方能使气氛稳定,随后进行生产。而抽空炉用机械泵抽气方法赶气,很快就能达到133.3 Pa,此时炉室内气氛中的含氧量为0.132%。并且用真空泵赶气的方法可以节约很多气量。抽空炉最大的特点是用气量少,仅为一般气氛炉的1/10,造价是一般真空炉的1/2~1/3,降低了生产成本。因此,抽空炉兼有真空炉和气氛炉的优点,而克服了它们各自的缺点,可作为一种经济炉型用于少无氧化光亮热处理生产。

### (四) 真空回火炉

回火是淬火工艺的后续,是确保淬火工件使用性能的重要环节,真空回火目的是在保持原真空淬火件无氧化、不脱碳、表面光亮等优点的同时去除淬火应力,防止工件开裂,得到所要求的性能和组织。为了提高炉温均匀性和提高加热速度,真空回火炉的炉室顶部装有循环风扇。回火炉抽真空后,回充高纯惰性气体,通常回充到 $0.6 \times 10^5 \sim 0.7 \times 10^5$  Pa,目前可以回充到 $1.2 \sim 2 \times 10^5$  Pa。炉室后部设置冷却循环风扇,风扇前部置有热交换器。真空回火保温结束以后,炉内充入正压气体(0.1~0.2 MPa,可以采用高纯氮气或采用混合气体95%  $N_2 + 5\% H_2$ ),充入气体经风扇、热交换器和导向板再流向工件,形成对流循环,以提高工件的冷却速度,抑制某些材料的第二类回火脆性并提高生产效率。图2-78为WZH60型回火炉结构示意图。

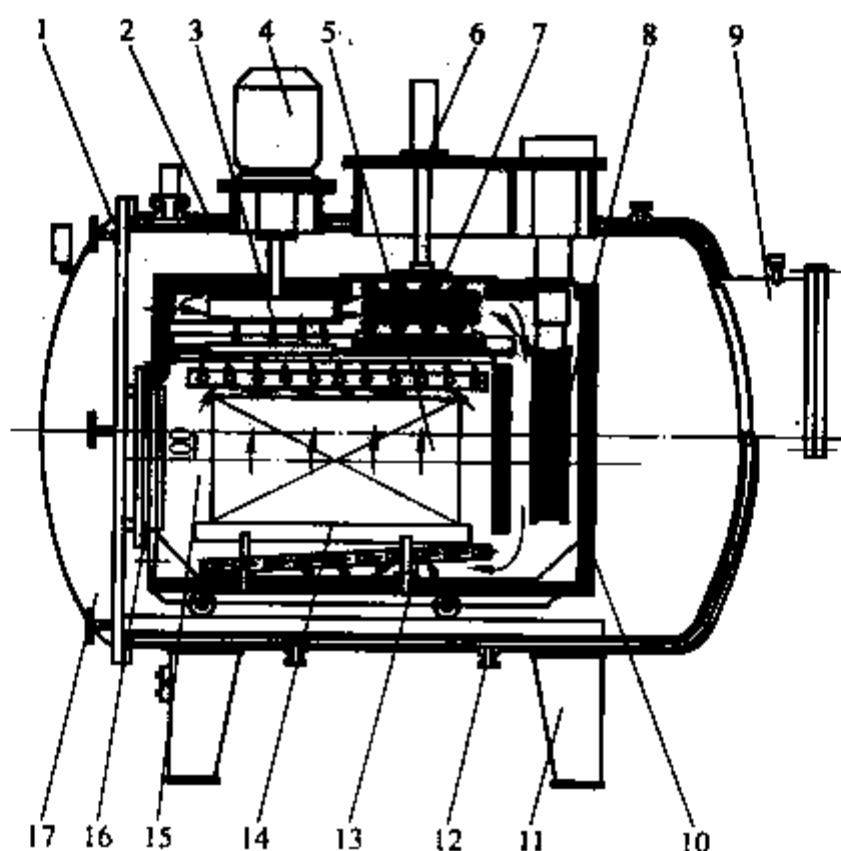


图2-78 WZH60型真空回火炉结构图

- 1—炉门; 2—炉壳; 3—风扇; 4—风扇电机; 5—有效加热区; 6—热交换器气缸; 7—热交换器;  
8—加热体; 9—真空机组接管; 10—隔热屏; 11—支架; 12—冷却水管; 13—导风板;  
14—炉床; 15—炉胆; 16—加热室门; 17—螺栓手柄(图中箭头为气流方向)

这类炉子主要用于高速钢、合金工具钢、模具钢、轴承钢、不锈钢及特殊材料的真空回火,也可用于有色金属的再结晶退火及时效处理。

(1) WZH系列正压真空回火炉(国产),见表2-69。

表 2-69 WZH 系列正压真空回火炉主要技术参数

型 号	WZH-20	WZH-30	WZH-45	WZH-60
加热区尺寸(mm)	200×300×20	300×500×300	450×670×400	600×900×600
装炉量(kg)	20	80	150	500
加热功率(kW)	15	30	40	80

注: 最高温度 700℃, 炉温均匀性±5℃; 极限真空度  $4 \times 10^{-3}$  Pa。

(2) VTF 系列真空回火炉(国产), 见表 2-70。

表 2-70 VTF 系列真空回火炉主要技术参数

型 号	VTF-24	VTF-35	VTF-80	VTF-100	VTF-180
有效工作尺寸(mm)	450×300×300	600×400×400	750×500×500	900×600×600	1 200×800×800
装炉量(kg)	120	200	400	600	1 500
加热功率(kW)	24	35	80	100	180

注: 最高温度 750℃, 炉温均匀性±5℃; 极限真空度  $4 \times 10^{-3}$  Pa; 压升率 0.65 Pa/h; 气冷压强 0.2 MPa。

#### (五) 真空退火炉

这类炉子适用于高速钢、高合金钢、电工磁性材料、有色金属、不锈钢等产品的光亮退火和固溶时效处理。

(1) VAF、VAFV 系列国产真空退火炉, 见表 2-71。

表 2-71 VAF、VAFV 系列真空退火炉技术参数

型 号	VAF-40	VAF-80	VAF-120	VAF-150	VAFV-50	VAFV-100	VAFV-150	VAFV-300
有效工作尺寸 (mm)	450×300 ×300	600×400 ×400	750×500 ×500	900×600 ×600	φ350 ×300	φ450 ×500	φ600 ×800	φ900 ×1 100
装炉量(kg)	100	200	300	400	50	100	250	400
加热功率(kW)	40	80	120	150	50	100	150	300

注: 最高温度 1 300℃, 炉温均匀性±5℃; 极限真空度  $4 \times 10^{-3}$  Pa; 压升率 0.65 Pa/h; 气冷压强 0.2 MPa。

(2) WZT、LZT 系列真空退火炉(国产), 见表 2-72。

表 2-72 WZT、LZT 系列真空退火炉主要技术参数

型 号	WZT-20	WZT-30	WZT-45	WZT-60	LZT-60	LZT-80	LZT-120	LZT-150
有效工作尺寸 (mm)	200×300 ×200	300×500 ×300	450×670 ×400	600×900 ×600	φ600 ×900	φ800 ×1 200	φ1 200 ×1 300	φ1 500 ×1 200
装炉量(kg)	20	50	200	300	120	250	500	1 000
加热功率(kW)	30	57	76	140	100	250	375	480

注: 最高温度 1 320℃, WZT 型炉温均匀性±5℃, LZT 型炉温均匀性±5℃; 极限真空度  $2.0 \times 10^{-1}$  Pa 和  $4 \times 10^{-3}$  Pa; 压升率 0.65 Pa/h。

## 四、真空热处理炉的辅助设施

### (一) 真空热处理炉循环水冷却系统

为确保真空炉的正常运行, 使真空炉(特别是气淬炉)能达到预定的冷却能力, 循环冷却水的流量、压力、水温、水质等必须满足设计指标要求, 否则难以确保炉子的冷却性能, 并会使真空炉的使用寿命降低。另外, 水冷却系统任何一个细节的疏忽和维护保养的失误都是真空炉的一种潜在隐患。

### 1. 循环水冷却的作用

(1) 冷壁式真空热处理炉外壁温度一般规定温升 $\leq$ 室温 $+20^{\circ}\text{C}$ ,炉壳隔层、炉门、热闸门、法兰连接及密封胶圈部位均需通入循环水进行冷却。尤其法兰连接部分及O形密封圈,在炉子加热过程中绝对不允许断水,否则会因O形圈烧坏使炉内漏入空气而烧坏炉子的保温层和加热元件。

(2) 真空炉的配套组件,如电源变压器、真空泵机组、风机电机、电热元件接头等部位均要用水冷却。

(3) 特别是气淬真空炉,在淬火冷却阶段,炉内的高压氮气需用大量冷却水通过热交换器带走工件热量,直至冷却周期结束。

### 2. 循环水冷却系统的基本参数要求

(1) 满足按不同真空炉类型、型号规格、数量及热处理工艺过程中所提出的水的流量和压力要求。

(2) 按水冷却系统是开启式还是封闭式,确定储水箱是否要设置在地面下。

(3) 循环冷却水的总流量应包括炉子加热阶段和淬火阶段的所需流量的总和。

(4) 循环水的压强。

(5) 进出真空炉的水温要求。

(6) 冷却水水质:硬度(毫克当量/升)、酸碱度、悬浮物。

(7) 满足节水、节能和环保要求,并能应对突发停电、停水事故,保证真空炉安全运行。

我国电炉行业对冷却水的要求为:进水压强 $0.2\sim 0.3\text{ MPa}$ ,进水温度 $5\sim 35^{\circ}\text{C}$ ,温升不超过 $20^{\circ}\text{C}$ ,水质酸碱度pH值 $6\sim 7$ ,硬度不大于10度(每度为1L水中含10mg氧化钙,总固体含量不超过 $25\text{ mg/L}$ )。

### 3. 循环水冷却系统的类型

1) 开放式循环水冷却系统(图2-79) 冷却方式及特点:有冷热分开的两个储水池,采用喷淋冷却塔进行循环水的冷却,冷水池中的水由冷水泵送至真空炉,炉子流出的热水自流回到地下热水池,并由热水泵送至喷淋塔冷却,回到冷水池后完成一次循环。

在淬火冷却时,可同时开启2台备用水泵加大冷却水流量来满足淬火用水。

该循环水冷却系统的配置能较好满足真空炉(或多台炉群)加热和冷却阶段不同水流量的要求,比早期的直排式或只有一个贮水池的冷却系统更合理。但开放式水冷却系统存在以下缺点:

(1) 喷淋塔冷却会造成水的蒸发、飘逸,水耗量大( $2\%\sim 3\%$ ),水漂雾会污染环境。

(2) 冷却水易被环境污染,使水质变差、变脏,管道易结垢、阻塞或腐蚀,影响循环水的压力和流量。

(3) 炉子水温的降幅受环境温度限制,在盛夏季节更明显。

(4) 热水池一定要设置在地下,增加了土建投资,并受场地条件限制。

针对开放式水冷却系统的缺点,目前较多采用封闭式循环水冷却系统。

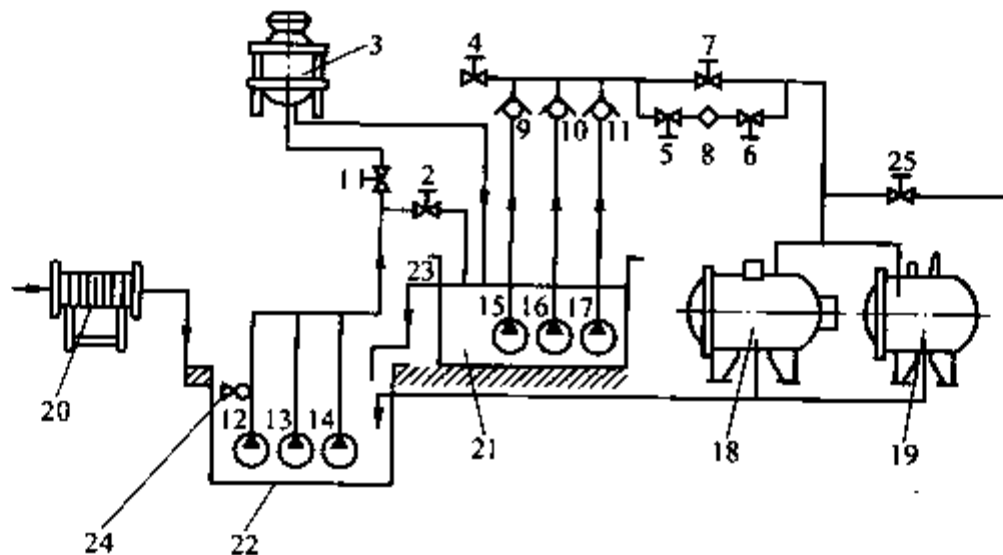


图 2-79 开放式水冷系统示意图

1、2、4、5、6、7—阀门; 3—冷却塔; 8—过滤器; 9、10、11—单向阀; 12、13、14、15、16、17—水泵; 18—真空淬火炉; 19—真空回火炉; 20—水处理装置; 21—冷却池; 22—热水池; 23—溢流管; 24—补充水阀; 25—应急水阀

## 2) 封闭式(铜盘管)循环水冷却系统(图 2-80)

(1) 原理: 利用水蒸发吸热的原理, 由真空炉流出的热水在封闭的铜盘管中通过, 铜管外壁喷淋水珠, 再由轴流风机抽风, 使铜管壁上的水膜快速蒸发, 管内流动热水则被冷却。

(2) 结构: 外形为长方形箱体, 内置铜盘管、引风机、喷淋头, 另配置喷淋水箱、软水处理器、电器控制柜等部件。

(3) 优点:

- ① 冷却水不与大气直接接触, 水质洁净, 水损耗少。
- ② 采用蒸发冷却原理, 热交换效率高, 降温快。
- ③ 循环水经软化处理, 管壁不结水垢。
- ④ 结构紧凑, 占地面积小, 不需土建工程, 节约投资。

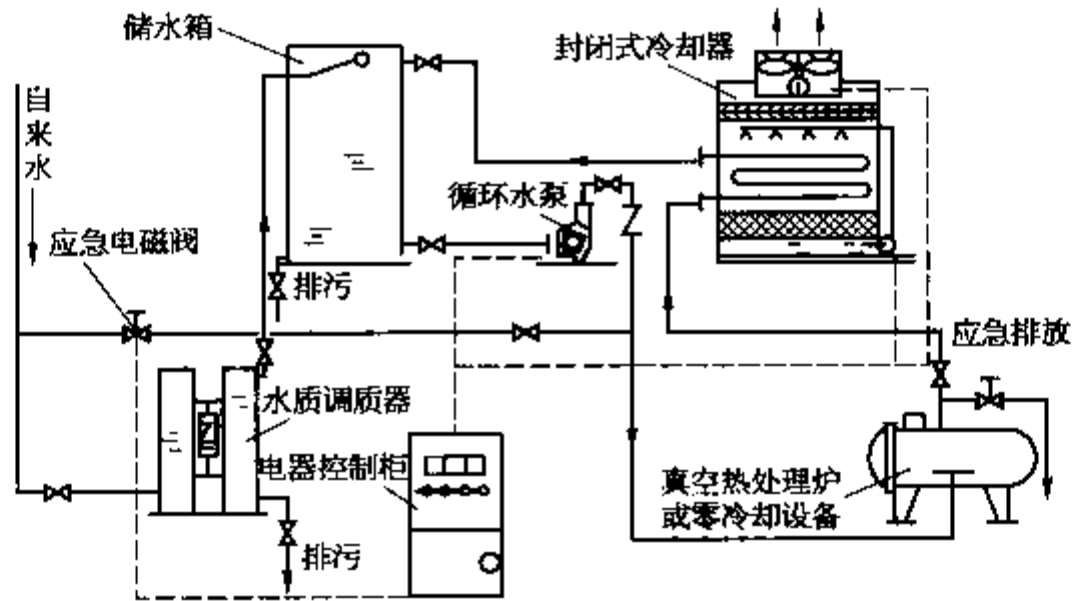


图 2-80 封闭式冷却系统循环图

这种封闭式(铜盘管)循环水冷却设备的代表性型号规格有 FBS-20~FBS-200, 后面的阿拉伯数字为流量值(t/h), 常用型号有 FBS-60、FBS-80、FBS-100、FBS-120。

主要技术参数:

出水温度:  $\leq 32^{\circ}\text{C}$ ;

工作压力: 0.2~0.5 MPa;

流量: 20~200 t/h;

水质: 城市自来水经软化处理;

pH 值: 7~8;

硬度:  $\leq 0.035$  毫克当量/升;

悬浮物:  $\leq 1 \times 10^{-3} \%$ 。

## 3) 封闭式(翅片铜管)单循环水冷却系统

这是 FBS 型封闭式冷却器的改进型产品, 其原理和结构大致相同, 主要差别有:

- (1) 原喷淋水自上而下改为自下向上喷雾冷却铜管外壁。
- (2) 喷雾水气直接由引风机排空, 不再循环使用。
- (3) 按照真空炉的需要, 可组合几台冷却器, 换热温差分别可达  $6^{\circ}\text{C}$ 、 $10^{\circ}\text{C}$ 、 $15^{\circ}\text{C}$ , 使用户有多种选择。
- (4) 使用带翅片铜管进行蒸发冷却, 增加了换热面积, 提高了冷效。

封闭式翅片管单循环冷却器的型号和规格有 DFL-5~DFL-200, 后面的阿拉伯数字为流量(t/h), 换热能力  $5.815 \times 10^4 \sim 2.326 \times 10^6$  J/s, 常用型号有 DFL-80、DFL-100、DFL-150、DFL-200 等。

## 4) 封闭式双循环水冷却系统

所谓双循环, 是由内外两个各自分开的水循环系统组成。内循环是闭环, 由内循环泵组和热水箱与真空炉用水连接; 外循环是开环, 由外循环泵组和冷水箱与喷淋冷却塔连接, 这两个水循环系统通过板式热交换器组

成双循环,并进行内外两路循环水的热交换见图 2-81。

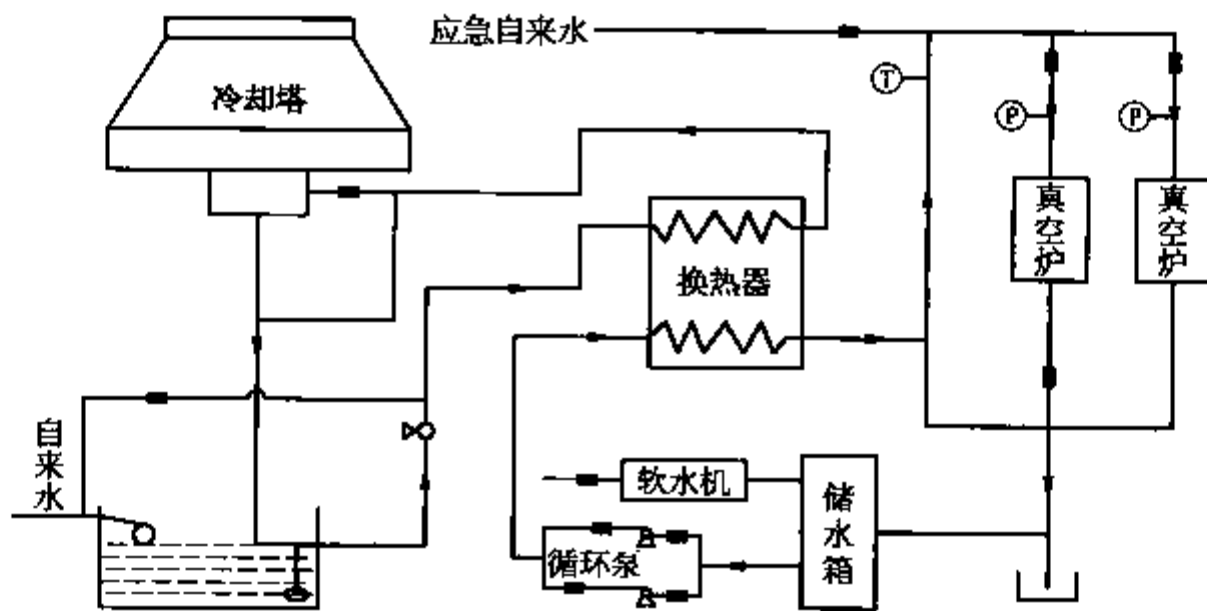


图 2-81 封闭式双循环水冷却系统示意图

双循环水冷却系统适用于需大流量、大换热量的单台或多台真空炉,该水冷却系统有更强的换热能力,最大换热温差可达  $20^{\circ}\text{C}$ ,即真空炉出水温度可比进水温度高出  $20^{\circ}\text{C}$ 。该系统的缺点是占用场地面积较大,高架的喷淋冷却塔对建筑有一定要求,投资费用较大。此外,外循环系统因为是开放式系统,水损耗较大,水质易受污染。封闭式双循环水冷却器的型号规格有 VSII-20 ~ VSII-300,后面的阿拉伯数字为内循环水量(t/h),常用型号有 VSII-80、VSII-100、VSII-200 等。

#### 4. 真空炉水冷却系统中的一些相关问题和注意事项

1) 突然停电的应急措施 在真空炉进水管路中,应设置应急水管,以便在突然停电或水泵故障时及时向炉子送水,保证炉子的冷却;同时打开炉子的应急排水阀,防止未经净化的自来水进入冷却器和水箱,避免浪费水系统中的软化水。应急水应保持一定的压力,有条件的可设置高位水箱,储存应急水。

炉子的工艺程序结束后,炉膛温度必须低于  $150^{\circ}\text{C}$  后才能关闭水源,防止烧坏密封胶圈,造成炉子的泄漏。通常的橡胶圈最高使用温度为  $150^{\circ}\text{C}$ ,即使是硅、氟橡胶圈也只能短时承受  $250^{\circ}\text{C}$ 。

2) 软水处理器 一般城市自来水不能满足真空炉水质的要求。制备软化水的方法很多,如离子交换树脂法、磁化处理、电渗析水及电子水处理仪等,这些方法较难与真空炉的自动化程序配套使用。近年来,国内已有多家公司开发出再生软化设备,能很好地满足真空炉循环冷却水的要求。

全自动软水器是采用钠离子交换树脂,将源水中的钙、镁离子置换出去,产生硬度极低的软水。当树脂吸收一定量的钙镁离子后就会饱和,必须进行再生(活化),用饱和的食盐水浸树脂层,把钙镁离子再置换出来,恢复树脂的软化能力,并将废液排出。

自动再生型软水器的再生方式可根据用户需要,有流量控制型和时间控制型两种,并且可在一天 24 小时内任意选定再生的开始和终止时间。全自动软水器型号规格繁多,其产水量可从  $0.5\text{ t/h}$  到每小时几十吨,用于真空炉的软水器常用单罐,产水量  $1\sim 2\text{ t/h}$  即可,它由树脂罐、盐桶和过程控制器组成。

3) 真空炉冷却水的压力稳定 设计循环冷却水系统时,单台真空炉是按淬火时的最大用水量计算的,多台真空炉是按各炉用水总流量计算的,但真空炉在实际运行时,炉子在加热和冷却阶段需要的用水量不同,而多台真空炉群往往不是全部炉子同时使用的。为了适应炉子运行情况的各种变化,循环水系统应配备水稳压装置。方法是使用变频装置,随时调节水泵电机的频率,变频信号则来自炉子进水管上的压力传感器。该变频装置既稳压又节能,适用于真空炉群的循环水冷却。

4) 循环水冷却系统的防冻措施 由于工厂所处地域环境差异和季节的交替,真空炉水冷系统常遇寒冬结冰问题,在北方地区常发生铜盘管冷却器冻裂事故。冷却器一旦冻裂,维修困难,会造成真空炉停产事故。对水冷却系统的防冻应注意以下事项:

(1) 应及早放空水冷却器铜管中的存水,一般水冷系统设计中可以自动完成此项操作。

(2) 场地条件允许的,可将循环水冷却器放在室内。

(3) 在循环水中加防冻剂,常用的是乙二醇,它与铜、钢等金属材料不会发生作用,乙二醇防冻剂添加浓度与气温有关,多数地区添加 40%即可,见表 2-73。

在冬季结束后,水中防冻剂必须清除,也可选用全天候带乙二醇运行的热交换器型号。

表 2-73 气温与乙二醇浓度关系表

气温(°C)	0	-3	-12	-22	-34
乙二醇浓度(%)	33	35	40	45	50

(4) 水冷系统的管道如为金属管,天冷时应包扎。更好办法是室外的进水管用防冻的 PE 管(-20°C),室内的炉子出水管用 PP-R 管(耐温 90°C)。

(5) 水冷却系统的防锈防垢。真空炉的水冷炉壳和水管通常是碳钢材料,在工厂生产条件下(水温冷热交替、炉子间断使用、水质变化等)常会使水系统出现黄锈、结垢和菌藻污染,应根据水质情况添加合适的防锈药剂(对管道有缓蚀、分散阻垢性能),使真空炉循环水冷却系统有较好的防锈防垢效果。另外,循环水系统的水箱尽可能采用“玻璃钢”、不锈钢,管道采用 PP-R 和 PE 管,阀门选用不锈钢,以保证水系统无锈蚀及避免菌藻类产生。

## (二) 氮气供给系统

真空热处理时,氮、氩、氦等惰性气体常用作填充气体和气淬的冷却介质,使用的惰性气体纯度均应 $\geq 99.99\%$ 。目前,国内真空热处理炉用的冷却气体大部分是氮气,氮、氩、氦气因价格较贵,除钛合金等材料真空热处理时非用它以外,一般较少采用。国内真空热处理炉使用氮气的来源主要有以下几种:

1) 纯度为 99.99% 的瓶装氮气 在国内应用最普遍。瓶装氮气优点是使用维护方便,质量由生产厂控制,可靠性好。缺点是价格较贵。如果用气量大的设备,更换钢瓶及运输则过于频繁,所以瓶装氮适用于用气量较少的设备。

2) 液氮气站供气 优点:纯度高(99.999%)、使用方便,1 L 液氮可气化 650 L 氮气,占地面积小,使用安全可靠;可由液氮供应单位随时用槽车送上门。随着高压气淬炉和高流率气淬真空炉的出现,更显出它的优越性。

其缺点:

① 远距离运输困难,有气体公司的工业城市周边 300 km 范围内才能供应。如超过距离,可改用低温液体钢瓶(杜瓦瓶)。

② 如不连续使用,液氮会蒸发损耗,日耗量为 0.3%~0.6%(容积)。

③ 液氮站装置无论是租用或自购,一次投资费用较高,并要建在马路边,以便液氮车输送。

真空炉是否使用液氮供应方式,首先取决于本地区是否有供应液氮的条件,其次是根据所用真空炉氮气的耗量进行经济分析,如图 2-82 所示。采用液氮供应方式,其液氮站装置费用(或支付租赁费)使起始成本较高( $T_1$ 点),如果用气量不多(低于 C 点)还不如瓶装氮气经济。如果用气量很大(越过 C 点),则用液氮站较经济,而且用气量越大越经济。所以,对一些有液氮供应条件的工业城市的高压气淬真空炉,液氮是一种较方便而经济的气源。

3) 低温液体钢瓶(杜瓦罐) 可为远离气体公司的用户提供罐装液氮,用户可按需求选择使用不同容积和不同压力的液氮罐。其构造与液氮槽大体相同,但容积较小。

4) 用碳分子筛制氮机制备氮气,再通过精净化处理其特点是制氮原料为空气,不受地区限制。设备正常情况下,价格便宜、产氮快、安全可靠。但制氮机在实际使用过程中故障多,特别是精净化装置阀门、密封件质量差。所以,目前用碳分子筛制氮机在国内真空热处理行业应用有限。

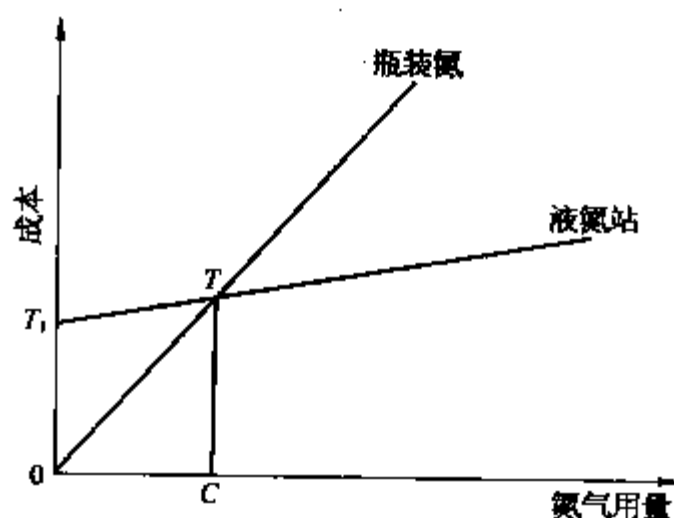


图 2-82 两种供氮方式的经济分析



## 五、真空热处理炉的选用、保养及其他

### (一) 真空热处理炉的选用原则

(1) 根据零件的热处理工艺要求,选用真空退火炉、真空淬火炉或真空回火炉。

(2) 根据被处理工件的几何形状、尺寸及产量,选择和确定炉子的大小及型号规格。

(3) 根据工件材料化学成分(是否含有真空中易挥发元素或易氧化的元素)确定选用高真空度、中真空度和低真空度的炉子,或可回充惰性气体分压加热的炉子。

(4) 如材料进行真空退火,则根据材料退火的工艺要求,对加热升温速度和冷却降温速度有严格要求的,则选用能自动调节控制升温、降温速度的负压内热式真空炉。

(5) 对真空淬火工件,应根据被处理工件的钢种在连续冷却条件下过冷奥氏体的分解曲线(C曲线)所要求的冷却速度及显微组织来确定选择油淬炉还是气淬炉,一般低合金钢选用真空油淬炉,高合金钢、高速钢选用高压气淬炉。

(6) 根据被处理工件的材料对碳的敏感程度选用合适的炉室构件材料。如一般黑色金属选用石墨加热元件和石墨毡隔热屏的真空淬火炉;对高温合金软磁材料,在加热时要求高真空且不允许材料有微量增碳情况,应选用 Mo 作为加热元件的金属屏真空炉。

(7) 需进行真空回火的工件,如有回火脆性倾向材料应选用有快速冷却装置的内热式真空回火炉;对回火后光亮度要求高的工件,应选择炉子压升率低、密封性好且能达到高真空度(带 3 级真空泵组)、回火后能快速冷却的内热式真空回火炉。

### (二) 真空热处理炉的基本技术指标(表 2-74)

表 2-74 真空热处理炉的基本技术指标

序号	名称	单位	序号	名称	单位
1	工作室尺寸	mm	12	油槽加热功率	kW
2	装炉量	kg / 炉	13	风冷电机功率	kW
3	最高温度	℃	14	整机总功率	kW
4	炉温均匀性	±℃	15	空炉抽空时间	min
5	极限真空度	Pa	16	空炉升温时间	min
6	压升率(泄漏率)	Pa / h(Pa · L/s)	17	空炉损耗功率	kW
7	加热功率	kW	18	冷却水消耗量	t/h
8	气冷压强	MPa	19	氮气消耗量	m <sup>3</sup> /次
9	工作真空度	Pa	20	外形尺寸	mm
10	额定电压	V	21	总质量	t
11	电热元件接线方式		22	占地面积	m <sup>2</sup>

### (三) 真空炉的性能试验方法

#### 1. 压升率和泄漏率

用关闭法测量,炉子经烘炉充分除气的条件下进行。在空炉冷态情况下,炉子达到极限真空度后,关闭真空系统各通气口的真空阀门,并关停真空泵。

压升率: 
$$\Delta p = (p_2 - p_1) / t \quad (\text{Pa/h})$$

其中,  $p_1$  为第一次读数时,真空室内的压强(Pa);  $p_2$  为第二次读数时,真空室内的压强(Pa);  $t$  为两次读数间隔时间,一般不得少于 30 min,第一次读数应在关闭真空阀门后 15 min 进行,两次读数采用同一支真空计。

泄漏率: 
$$\Delta Q = (\Delta p V) / 3\,600 \quad (\text{Pa} \cdot \text{L/s})$$

其中,  $V$  为真空室容积(L)。

压升率和泄漏率都是衡量真空炉密封性的指标,对不同规格的真空炉采用泄漏率指标来比较炉子的密封性更显合理,但日常检验炉子泄漏时常用压升率。真空炉供需双方可协商任取其一即可。

### 2. 极限真空度

炉子应经烘炉并充分除气后,在冷态情况下,用真空炉本身配套的真空系统进行测量,按正常情况下启动真空泵,应达到炉子技术文件中规定的极限真空度值。

### 3. 工作真空度

真空炉按规定的装炉量和试验工艺进行生产运行试验,应能达到技术文件规定的工作真空度。

### 4. 炉温均匀性

在炉子的有效温度范围内进行空炉考核,炉温达到指定温度并在热稳定状态下,炉内的真空度不低于工作真空度值。参照 GB/T9452—2003《热处理炉有效加热区测定方法》,在真空炉有效加热区内选 5 点或 9 点测温点进行测量。每个温度测 5 次,取 5 次最大温差值的平均值,作为该点炉温的均匀性。要求各点考核温度下测定的炉温均匀性均达到真空炉技术文件规定指标。

### 5. 空炉功率损耗

在测定炉温均匀性的同时,可读出各测量温度点的电流和电压读数,即可计算出各测量温度点的空炉功率损耗。

### 6. 空炉升温时间

炉子处于室温,并抽到极限真空度后,即可进行试验。接通电源后,炉子由室温达到额定温度的时间即为空炉升温时间。在升温过程中真空度应不低于工作真空度值。如炉子使用多支测温热电偶,则升温时间是指各测温点中最后到达额定温度所需的时间。

### 7. 炉子最高温度

在试验 6. 后用炉子本身配套测温元件进行测量,应达到技术文件中规定的最高温度。

### 8. 加热功率

可与试验 5. 同时进行,在真空炉升温过程中可根据功率表或电压表和电流表读数按接线方法计算真空炉的输入功率。

### 9. 空炉抽空时间

在试验 2. 中,从炉内起始压力为一个大气压时启动真空泵抽气到炉内真空度达到极限真空度(或技术文件中规定的真空度)的时间即为空炉抽真空时间。在试验中,油扩散泵和油增压泵的预热时间不应包括在空炉抽真空时间内。

### 10. 炉温控制精度

真空炉处于空炉额定温度下的热稳定状态、炉内的真空度不低于工作真空度值时,用测量温度用的电位差计测量,在一定的时间内(至少 10 min)测出炉温的最高值和最低值,求出其差值。炉温控制精度等于连续测得几次(至少 5 次)差值的平均值。

### 11. 耗水量

真空炉应处在热稳定状态下,把进水压力调节到技术文件中规定的最低值,调节各路水的流量使水的各路温升值尽可能在技术文件中规定允许温升值的 75%~100% 范围内。由水表测出一定时间内流出的水的体积,即真空炉最小耗水量的大概值。

### 12. 冷却水温升

炉子处于热稳定状态下,把进水压力调节到技术文件中规定的最低值,用玻璃温度计测量冷却水进口温度和出口温度的差值。此时所测得的冷却水温升值不应大于 20℃ 或技术文件中所规定的允许值。

## (四) 真空炉的验收工作

用户根据真空炉产品技术标准和订购炉子时的协议书进行验收。根据协议内容,用户除在炉子制造厂进行一定的项目预验收外,还要在使用厂现场进行一些项目的终验收及工艺试验工作,以确认炉子的技术性能指标和使用性能是否达到技术标准和用户要求。表 2-75 为真空热处理炉的检查和验收项目。

表 2-75 真空热处理炉检查和验收项目

序号	项 目 名 称	验 收 方 式	
		预验收	终验收
1	外观质量:外表面平整度,油漆质量等	√	√
2	工作室尺寸的检查	√	
3	绝缘电阻的测量	√	√
4	外购配套件型号、规格和出厂合格证书等的检查		√
5	极限真空度测量	√	√
6	工作真空度测量	√	√
7	压升率的测量	√	√
8	最高温度的测量	√	
9	额定功率的测量	√	√
10	气冷压强试验	√	√
11	安全保护装置试验,检查	√	√
12	电气运行操作验收(手动、全自动过程)	√	√
13	炉温均匀性的测量		√
14	电热元件制造质量及冷态电阻值测量	√	
15	水路、气路、液压系统的检查	√	√
16	空炉抽空时间测量	√	
17	空炉升温时间测量	√	
18	耗水量测量		√
19	冷却水温测量		√
20	连锁保护系统的检查	√	√
21	炉温控制精度测量	√	
22	油淬时工件转移时间测量	√	
23	空炉损耗功率测量	√	

注:预验收在炉子制造厂进行,终验收在用户使用现场进行。

### (五) 真空炉的保养技术

由于真空热处理炉的种类和型式很多,因此维护和检修的项目各不相同。维修检查内容应根据炉子技术文件并可按实际需要分为每炉次、每日、每月、每半年和每一年进行的项目。

#### 1. 每炉次、每日进行的维修和检修项目

- (1) 对有气锁功能的真空泵,应在每日开炉前检查并根据需要开启 30 min,以排除泵油中的水分。
- (2) 经常检查冷却水、压缩空气、液压系统的压力以及冷却水的流动情况。
- (3) 对炉门的橡胶密封件和法兰面应在关炉门之前进行检查,不能有砂粒和杂物,用干净绸布擦拭橡胶密封圈及法兰面,再均匀涂上真空脂后方可关闭炉门。
- (4) 工件入炉处理前必须清洗。油淬处理后应将浸过油的料框、运载部件上的油全部清洗干净。
- (5) 风冷电机一般为常用电机,在真空下不能启动,一定要充气以后才能启动并应有电气连锁保护装置保护。
- (6) 罗茨泵应在 133 Pa 以上的真空度才能启动,也应有电气连锁保护装置保护。
- (7) 对有压缩空气的管路,每天应开启排水阀放出积水。
- (8) 经常注意冷却水的进出水温指示是否正常,经常检查触摸电极接头、炉门、变压器冷却水管等部位是否有局部温升异常情况。

(9) 每次开炉前检查加热元件与炉壳间的绝缘电阻值是否在允许的范围之内。

(10) 真空淬火油要多次、反复脱气,出炉前要及时脱气。

(11) 定时巡回检查各类水压力表、电气表具和仪表记录仪等运行是否正常(即使有报警保护)。

## 2. 每月进行的维护和检修工作

(1) 将炉门上的橡胶密封件从炉门法兰面上卸下,用丙酮将上面的真空脂擦净,再涂上一层薄薄的干净的真空脂。

(2) 检查机械泵和罗茨泵上的油标线,油面过低要加油,油太脏要及时换油。

(3) 真空室中的气冷风扇及热循环风扇中的轴承处需注润滑剂。

(4) 对真空渗碳炉,机械真空泵油中如有炭黑,会影响抽真空,应全部换新油,并用新油冲洗泵室 3~4 次。其他真空炉一般可按真空度下降程度决定换油期限。

(5) 加热室炉壳及后盖上的油和炭黑应擦洗干净。

(6) 对双室炉,检修小车的运行情况以及对电气指示灯、限位开关等有关零件进行检查等。

## 3. 每半年至一年进行的维护和检修工作

将炉体中的冷却水放掉,去除水垢及污泥等。每年对真空泵、循环水泵、压缩空气泵及液压系统进行一次检修。

## 4. 其他需不定期进行的维护和检修工作

(1) 凡活络接口部分,橡胶密封圈长期处于压缩状态之后将永久变形,如经拆动则需更换。

(2) 真空炉停炉期间需将炉门关闭,并抽成真空(39.9 kPa)以下状态,防止炉内吸潮及杂物进入炉内。

(3) 对没有隔热真空密封闸门的双室真空炉,加热室内的温度必须降到 120℃ 以下才能打开炉门使工件出炉,以降低加热元件和石墨隔热件的氧化程度,从而可延长其使用寿命。

(4) 在寒冷地区的工厂,如冬天不能保证工作场所在 0℃ 以上的,应及时将真空炉中的冷却水排净。

(5) 石墨布加热元件有隔热密封门的,使用寿命为 15 000~20 000 h;无密封门的,为 4 000~6 000 h;真空渗碳炉上石墨布使用寿命为 200~500 h。石墨毡使用 20 000 h 以后,也应检查一下,去掉表面 2~3 层,更换新的。而加热元件使用一定期限后,炉子的实际功率将显著小于额定功率,空炉升温时间如过长,则要全部更换加热元件。

(6) 除单相小型炉外,三相电源的炉子的各加热元件的电压电流数值差应在 5% 之内,差值较大时应排除故障。

(7) 真空计、热电偶、真空泵、液压泵等应按使用说明书规定进行维护和检修。

(8) 维修操作时应在停电情况下进行。

## 5. 几种应急措施(表 2-76)

表 2-76 几种应急措施

紧急情况	产生后果	处理措施
加热过程中压缩空气突然停气或压力不够	气动真空阀门不能动作,大量空气进入炉内,使加热元件及隔热材料烧坏	1) 马上用普氮并减压后接入管道将阀门关死 2) 停加热电源,立即通入高纯氮气,炉子快速冷下来
加热过程中突然停水	炉子冷却部分因没水使温度上升,如密封橡皮损坏,空气漏入炉内烧坏炉子内胆及加热元件	1) 水压表中电接点动作炉子断电,停止加热 2) 关真空阀门,关罗茨泵后关机械泵 3) 立即通入高纯氮气,使炉子快速冷却下来 4) 启动应急用水
加热过程中突然停电	炉子不能动作,工件进出料不能动,用循环水的水泵也会停,使炉子停水	1) 关总电源 2) 关闭各管路真空阀门,防止空气进入炉内 3) 加热室通入高纯氮气,使炉子快速冷却下来 4) 立即启动应急用水
加热过程中加热室某处突然漏气	空气漏入炉内烧坏炉子内胆及加热元件	1) 用真空封泥堵漏 2) 马上关总电源 3) 炉内通入高纯氮气,使工件及炉子快冷,炉内压强接近大气压,使漏入的空气减少

## 第一节 表面加热淬火

## 一、火焰淬火

火焰淬火为：利用氧-乙炔(或其他可燃气体)火焰使工件表层加热并快速冷却的淬火。

## 1. 概述

火焰淬火对大型构件和构件内一些表面的淬火仍有应用,在美国约占5%~10%。火焰淬火工艺的优缺点和确定工艺的一般导则见表3-1。

表3-1 火焰淬火工艺的优缺点和确定工艺的一般导则

优点	缺点	确定工艺的一般导则
1) 淬硬深度为0.8~6.4 mm,与燃料气、喷头设计、加热时间、工件的淬透性和淬火方法相关 2) 能快速获得高硬度的耐磨表面,应用于较便宜的钢材,在硬度、强度和磨损性上与合金钢相当,无氧化无脱碳,不需要后清理 3) 尺寸稳定性控制容易 4) 大小工件适用广(30 g~25 t) 5) 适合加工任何形状工件 6) 采用大批量自动化设备生产能实现重现性 7) 能使碳钢符合严格的技术要求 8) 适于工件小区域淬火回火	1) 要求操作人员具有一定经验,但在自动化操纵机械上可减小这种依赖性 2) 加热温度目测要求高,但能应用红外高温计监控	1) 确定合适的淬火区和相应技术要求,喷枪加热区域大时则要求水淬 2) 选定合适的火焰喷枪和焰炬喷嘴 3) 避免加热时间过长,喷嘴与工件间距较近、燃料气/氧气比值不正确和不适当喷嘴型式等会引起工件过热,一般棱角尖锐处过热危险大 4) 不均匀加热、冷却、过快冷却和对高淬透性材料,易引起畸变 5) 及时对淬火件进行火焰加热回火、自回火或炉中回火 6) 淬火处理表面应进行预热 7) 不应该对不适合进行本处理的零件进行处理,如有尖角、小直径内角和不宜水淬工件 8) 尽可能不使火焰淬火区重叠,以免引起开裂 9) 对大件,特别进行水淬时,对淬火区要进行渗透剂开裂检查 10) 铸锻件的表面缺陷区不利于进行火焰加热表面淬火,例如重叠、封口、折叠、飞边、氧化皮、锈蚀、脱碳、针孔、缩孔、粗晶浇口区和不良焊口等

## 2. 加热热源和装置

## 1) 火焰和可燃气体

(1) 喷射器(喷枪):喷枪是使可燃气体与氧气以一定比例混合并形成火焰的工具,可分为射吸式和等压式两种,我国的一般为前者。国产HY-3火焰淬火喷枪结构示意图和焊炬改装喷枪见图3-1。

(2) 火焰喷嘴:可燃气体和氧气混合后经喷嘴喷出后点火燃烧。喷嘴的设计和制造是决定淬火质量的关键。常见的喷嘴有连续式淬火喷嘴(图3-2)、同时加热喷嘴(图3-3)、空气燃料气烧嘴等。

(3) 火焰及温度分布:喷嘴喷出的火焰按可燃气体和氧气的比例不同可分为还原性焰、中性焰和氧化性焰三种。以 $O_2-C_2H_2$ 为例,常用比值为1.15~1.25的火焰为中性焰,其示意图见图3-4,它由焰心、内焰和外焰组成。位于喷嘴出口处的焰心是光亮蓝白色的小圆锥体。一般距焰心顶端2~3 mm处,温度可达3200℃。喷嘴与工件一般保持10~40 mm距离。 $O_2$ 和 $C_2H_2$ 混合气体燃烧消耗量一般为2.7~8.5 m<sup>3</sup>/h,随硬化层深度增加,它们的压力和消耗量增加。

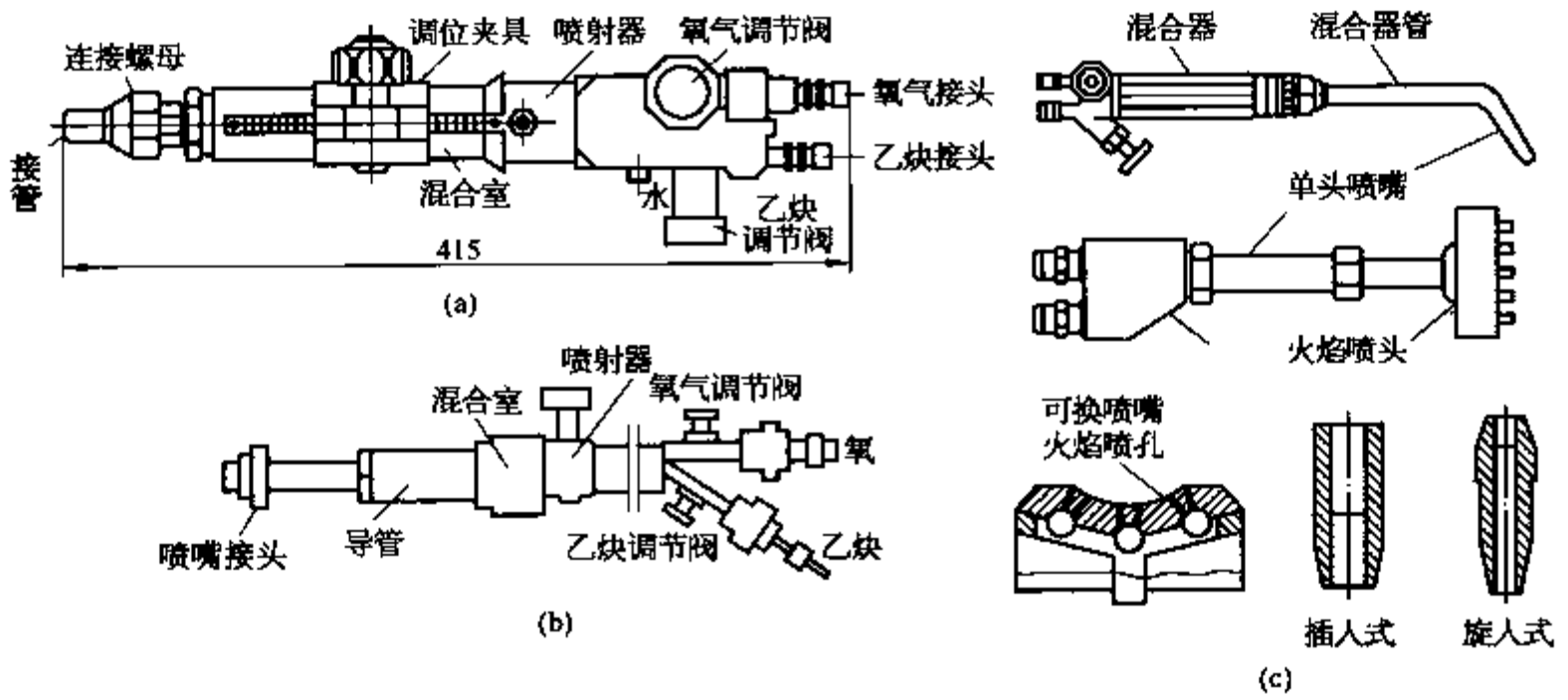


图 3-1 火焰淬火喷枪示意图

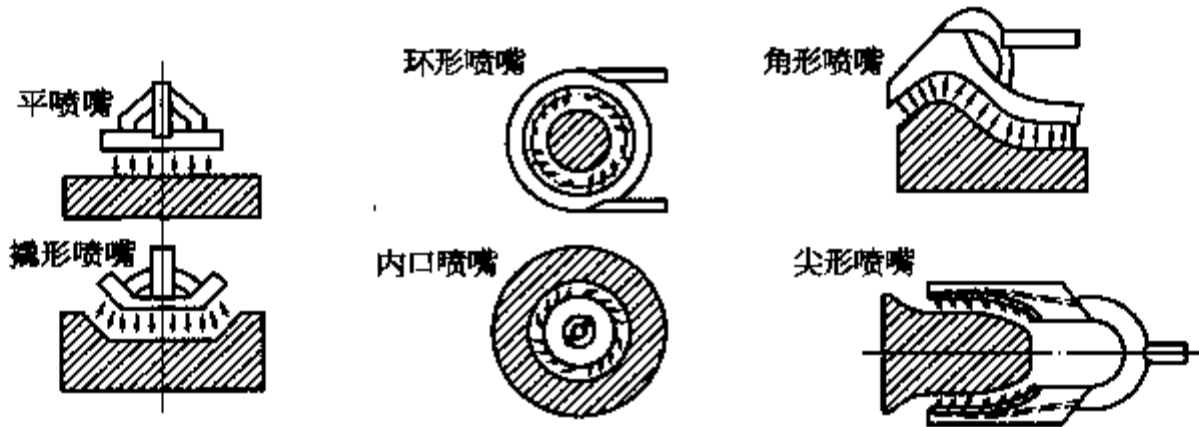


图 3-2 连续式淬火喷嘴示意图

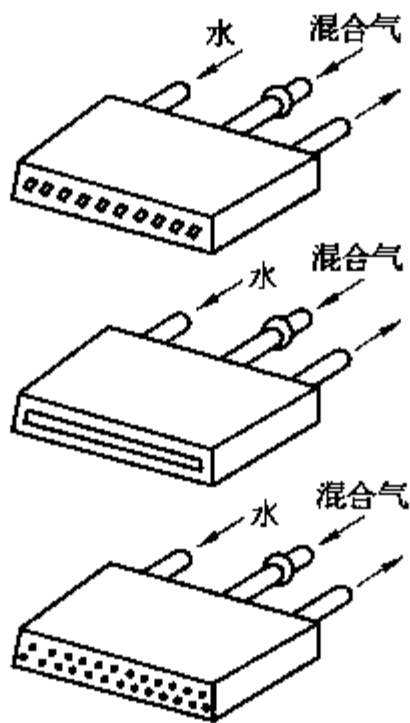


图 3-3 同时加热喷嘴结构示意图

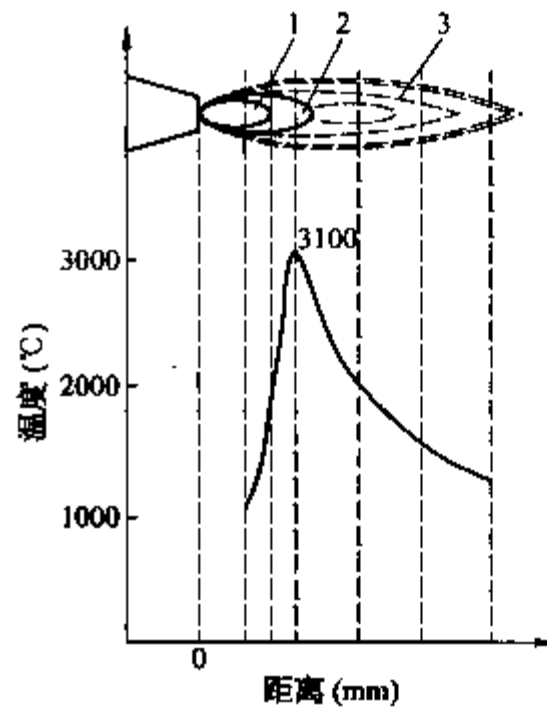


图 3-4 氧乙炔火焰所形成的中性火焰的组成及沿火焰长度温度分布

1—焰心; 2—内焰; 3—外焰

(4) 可燃气体：火焰淬火用可燃气体见表 3-2，常用的为乙炔  $C_2H_2$ 。

表 3-2 用于火焰淬火的燃料气

燃料气	加热值 (MJ/m <sup>3</sup> )	火焰温度		氧与燃料 气常用 比率	氧与燃料 气混合气 加热值 (MJ/m <sup>3</sup> )	正常燃 烧速率 (mm/s)	燃烧强度 <sup>①</sup> [(mm/s) (MJ/m <sup>3</sup> )]	空气与 燃料气 常用比率
		用氧气 (°C)	用空气 (°C)					
乙炔	53.4	3 105	2 325	1.0	26.7	535	14 284	12
城市煤气	11.2~33.5	2 540	2 985	②	②	②	②	②
天然气(甲烷)	37.3	2 705	1 875	1.75	13.6	280	3 808	9.0
丙烷	93.9	2 635	1 925	4.0	18.8	305	5 734	25.0

注：① 燃烧强度为正常燃烧速率和氧与燃料气混合气加热值的乘积。

② 随组成和加热值改变而变化。

2) 火焰加热表面淬火设备 见表 3-3(参考 JB/T9200—1999)。

表 3-3 火焰加热表面淬火设备

设备名称	简单叙述	要求
燃料气供给装置(乙炔)	有乙炔发生器、乙炔瓶、乙炔汇流排或乙炔输送管道等，含乙炔输出控制器、压力计和安全阀	乙炔压力控制 $0.9 \times 10^5 \sim 1.1 \times 10^5$ Pa 乙炔气体温度 $\geq 60^\circ\text{C}$ 乙炔发生器水温 $\geq 40^\circ\text{C}$
氧气供给装置(O <sub>2</sub> )	有氧气瓶、氧气汇流排或氧气输送管道、含输出控制器、压力计和安全阀	小件淬火输出氧气压强控制为 $2 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$ Pa，大件的为 $5 \times 10^5 \sim 15 \times 10^5$ Pa，氧气瓶压力应为 $210 \times 10^5$ Pa
测温装置	光电高温计或便携式红外辐射温度计(处理重要工件时)	如 WDL-31 型光电温度计，1000 型便携式红外辐射高温计等
淬火机床	批量生产时据工件形状大小数量选合适的机床进行火焰功率、加热温度和加热时间调节控制	主轴锥孔径向跳动，回转工作台面跳动精度均为 $0.3 \text{ mm}$ ；顶尖连线对滑板移动平行度 $0.3 \text{ mm}/\leq 2000 \text{ mm}$ ；工件进给速度变化 $\pm 5\%$
淬火冷却设备	采用浸淬或投入淬冷的冷却槽，应有足够容量，有的应配循环系统和温度调节或控制装置以符合冷速要求	保证获得马氏体组织，但不应使工件冷却过快而发生较大畸变和开裂
回火设备	炉中回火时设备应注意加热均匀性和测温的准确性，并有自动记录	炉内有效加热区允许的温度偏差对重要件和一般件分别为 $\pm 15^\circ\text{C}$ 和 $\pm 20^\circ\text{C}$

### 3. 火焰淬火回火处理及操作

#### 1) 适用钢种(表 3-4)

表 3-4 火焰淬火回火处理适用钢种

类别	钢号
碳素结构钢	35, 40, 45, 50, 55, 60; 35Mn, 40Mn, 45Mn, 50Mn, 60Mn
合金结构钢	35Mn2, 40Mn2, 45Mn2, 50Mn2, 60Mn2; 35SiMn, 42SiMn; 40B, 45B, 50B; 40MnB, 45MnB, 40MnVB; 35Cr, 40Cr, 45Cr, 50Cr; 35CrMn, 42CrMo; 35CrMoV; 40CrV, 40CrMn, 40CrNi, 45CrNi
弹簧钢	65, 65Mn, 55SiMn, 60Si2Mn, 55SiMnB
轴承钢	GCr6, GCr9, GCr15, GCr9SiMn, GCr15SiMn
低淬透性钢	55Ti, 66Ti
工模具钢	T7, T8, T8Mn, T9, T10, T11, T12, 9CrSi, 9Mn2V, 5CrMnMo, 5CrNiMo, 7CrSiMnMoV

(续表)

类别	钢号
不锈钢,耐热钢	12Cr13, 20Cr13, 30Cr13, 42Cr13, 42Cr9Si2, 40Cr10Si2Mo
铸钢	ZG270 - 500, ZG310 - 570, ZG340 - 640, ZG40Mn, ZG50Mn, ZG50Mn2, ZG40Cr, ZG50CrMn, ZG50CrMo, ZG35CrMnSi, ZG35SiMn
铸铁	HT200, HT250, HT300, HT350, KTZA50 - 06, KTZ550 - 04, KTZ650 - 02, KTZ700 - 02, QT400 - 18, QT400 - 15, QT450 - 10, QT500 - 7, QT600 - 3, QT700 - 2, QT800 - 2, QT900 - 2

2) 火焰加热淬火方法 按表面加热和冷却方式分同时加热淬火法和连续加热淬火法(表 3-5)。相应的示意图见图 3-5 以及图 3-6。

表 3-5 火焰加热淬火方法

方法	同时加热淬火法	连续加热淬火法
定义	将工件需淬火的部位加热到淬火加热温度,然后喷冷却介质、浸液或投入淬火槽冷却	将工件需淬火的部位连续进行奥氏体化加热和淬火冷却
分类	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 固定法: 淬火工件和火焰喷嘴相对固定,工件淬火部位表面加热到淬火温度,然后喷冷或投入冷却槽。适用局部淬火工件,如螺钉头、气门顶杆端头的淬火</li> <li>2) 快速旋转法: 用一个或几个固定喷嘴加热工件表面,快速旋转(75~150 r/min)一定时间,达到淬火加热温度,然后喷冷或投入冷却槽。适用于淬硬宽度不大的旋转体,如轴颈、凸轮、直径和模数较小的齿轮等</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 平面前进法: 火焰喷嘴和淬火嘴间距 10~30 mm,前后沿淬火工件平表面以 50~300 mm/min 速度直线移动进行加热和淬火。适用于淬硬床身导轨,大数模齿轮的单齿淬火等</li> <li>2) 旋转前进法: 工件以 50~300 mm/min 速度缓慢转动,火焰喷嘴和淬火嘴在轴侧同一位置前后固定进行连续加热淬火。缺点是会出现淬火带重叠形成软带或开裂。适用于大型制动轮、滚轮、大型轴承圈等</li> <li>3) 螺旋前进法: 轴类工件以一定速度旋转,火焰喷嘴和淬火嘴沿轴向前进,工件转一周时喷嘴前进距离为喷嘴宽加 3~6 mm,得到螺旋形淬硬表面。缺点是有时会形成螺旋形软带。适用于大型轴类件,如大型柱塞、轧辊等</li> <li>4) 快速旋转前进法: 一个或数个火焰喷嘴和淬火嘴或环形喷嘴包围高速旋转(75~150 r/min)的工件,并以一定速度沿轴向前进,相随一起进行加热和淬火,不产生软带。适用于细长工件,如锤杆、小型轧辊和长轴等</li> </ol>

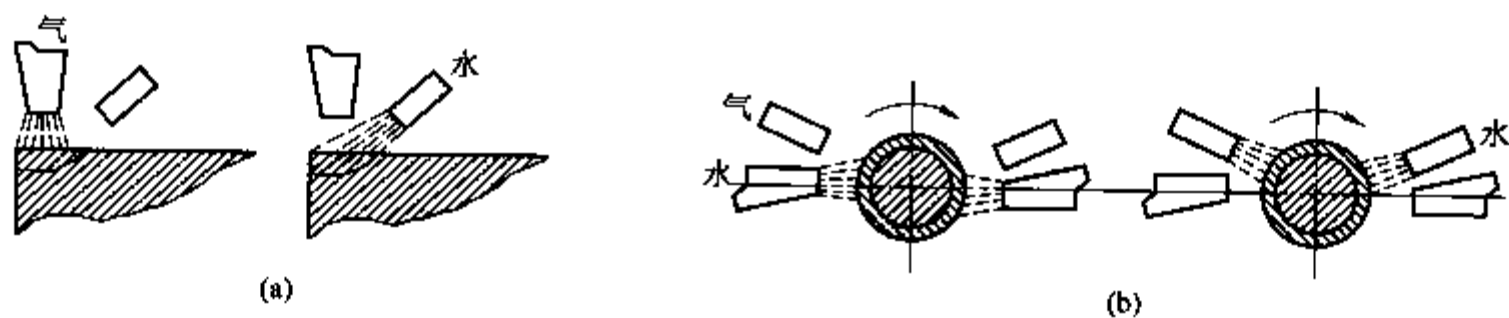


图 3-5 同时加热淬火法示意图

(a) 固定法; (b) 快速旋转法

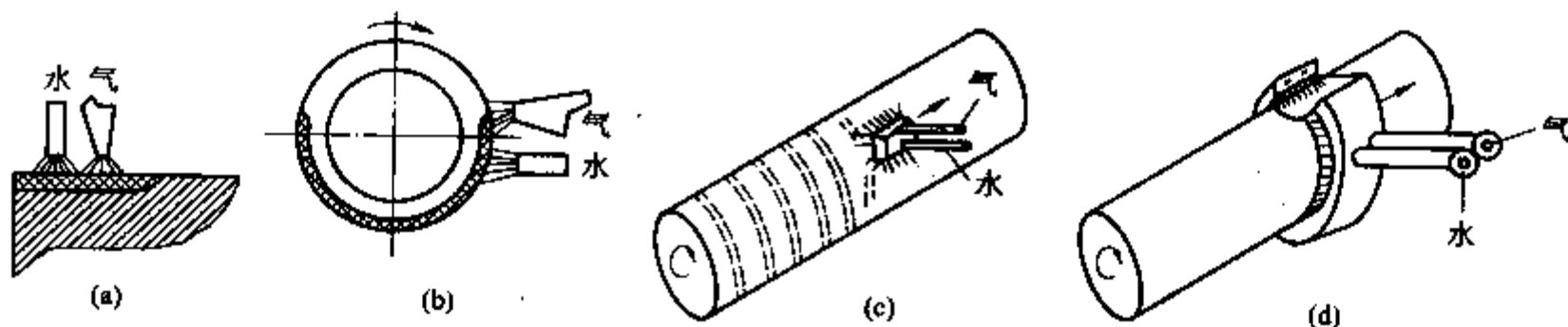


图 3-6 连续加热淬火法示意图

(a) 平面前进法; (b) 旋转前进法; (c) 螺旋前进法; (d) 快速旋转前进法



火焰加热淬火的典型应用实例如摇臂和内凸缘轮凹棘槽的固定法火焰表面淬火(图 3-7 未画出淬火), 小型齿轮、凸轮轴和固定悬臂内孔的旋转法火焰表面淬火, 长型刃板和平导轨的连续表面淬火(图 3-8), 轴的旋转连续火焰加热淬火(图 3-9)等。

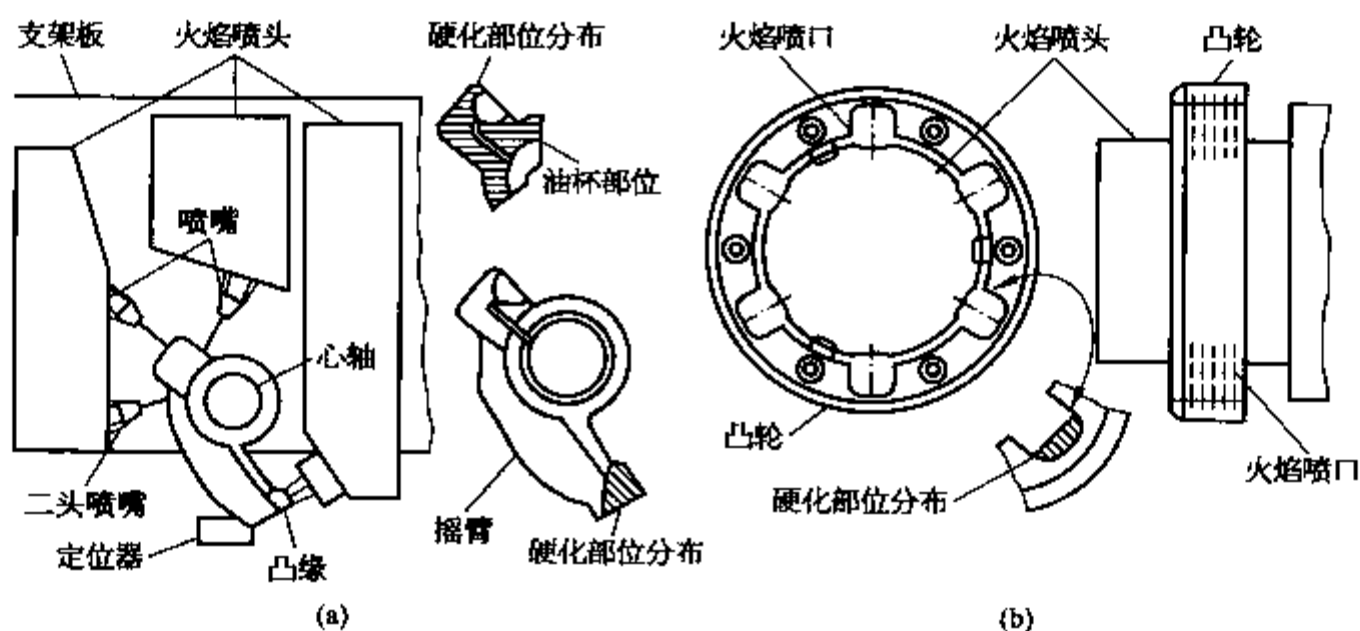


图 3-7 摇臂和内凸缘轮凹棘槽的固定法火焰表面淬火

(a) 摇臂; (b) 内凸缘轮凹棘槽

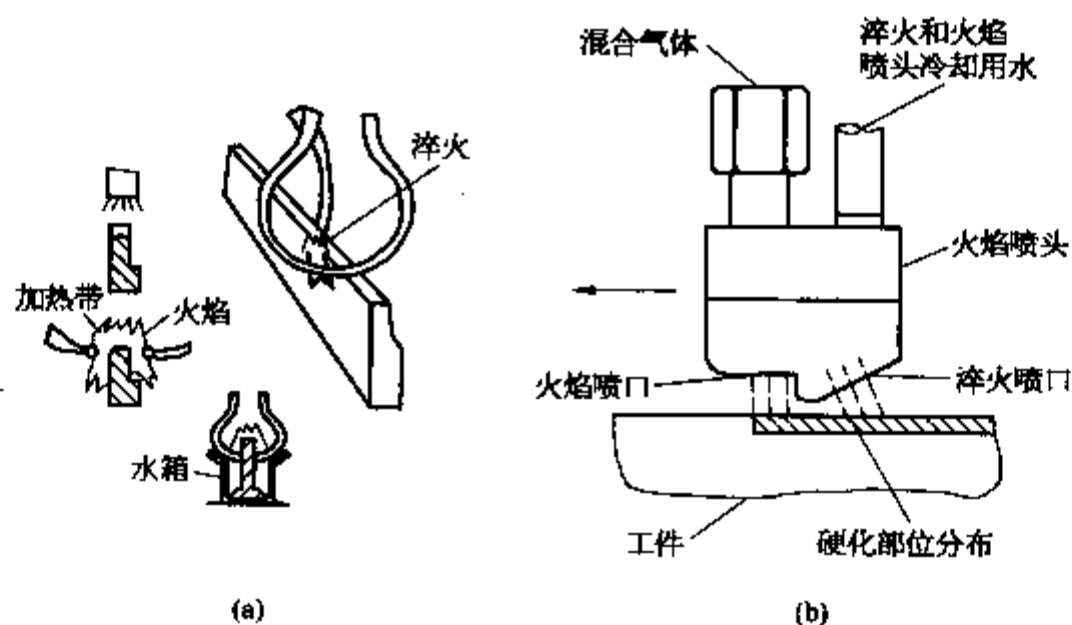


图 3-8 长型刃板和平导轨的连续火焰表面淬火示意图

(a) 长型刃板; (b) 平导轨

### 3) 工艺参数和影响因素

(1) 火焰淬火加热温度和加热速度: 火焰淬火加热温度比普通淬火温度一般高  $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 。表面加热温度  $T_s$  的影响因素有:

① 连续加热时,  $T_s$  取决于工件和喷嘴间相对移动速度; 固定或旋转加热时,  $T_s$  取决于加热时间  $t$ ,  $t$  越长,  $T_s$  越高(图 3-10)。

② 喷嘴与工件间距, 火孔所在平面至工件表面距离称为加热距离  $L$ 。火孔直径和气体压力越大, 火焰长度越长, 加热距离  $L$  越长。火孔直径为  $\phi 0.4\sim 0.5\text{ mm}$  和  $\phi 1.0\sim 1.2\text{ mm}$  时, 相应的  $L$  为  $8\text{ mm}$  和  $10\sim 12\text{ mm}$ 。

火焰加热的加热速度与喷嘴尺寸、燃料气体种类与混合比、混合气体压力和消耗量有关。图 3-11 所示为火焰加热速度与硬化层的关系。

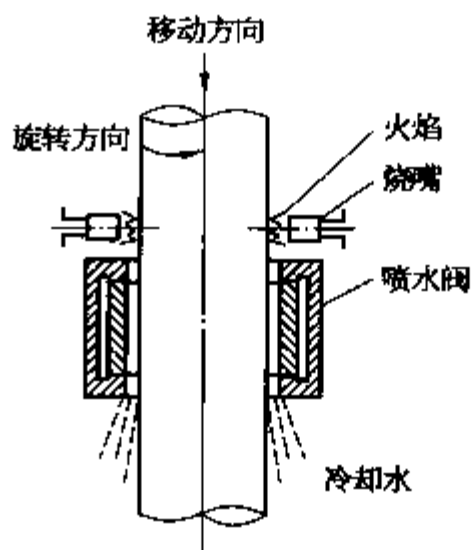


图 3-9 轴的旋转前进法火焰淬火

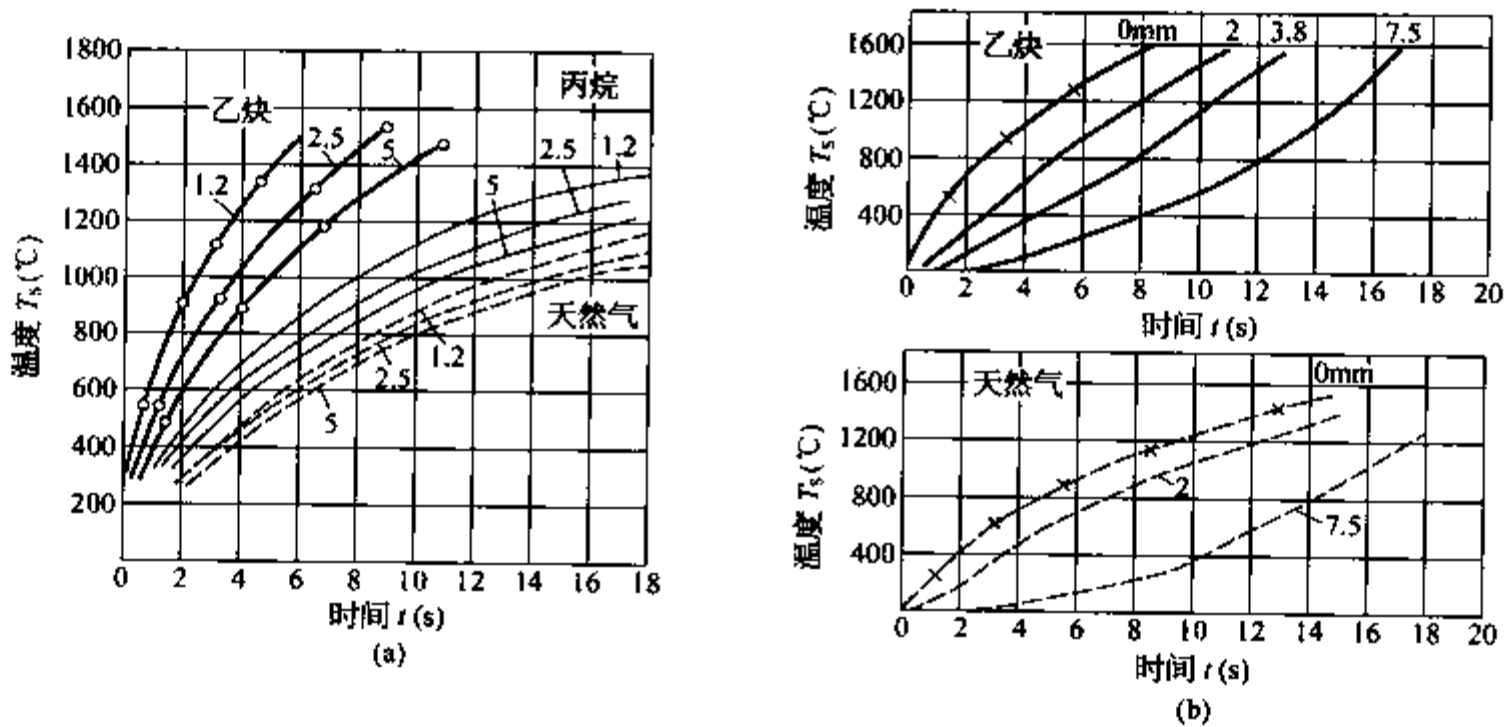


图 3-10 不同加热方式加热时表面温度  $T_s$  和加热时间  $t$  的关系

(a) 固定法加热(摇臂杆); (b) 旋转加热法(圆柱体)

(2) 火焰淬火硬化层深度: 可在 0.8~6.4 mm 范围变化。影响因素:

① 固定法或旋转加热时取决于加热温度  $T_s$  和加热时间  $t$ 。

② 连续加热淬火时的影响因素: 氧气压力增高, 硬化层深度增加, 但超过峰值, 深度反而降低, 最佳火焰强度的  $O_2/C_2H_2$  值为 1.15~1.25。喷嘴或工件移动速度越大, 硬化层深度越小(表 3-6); 一般在 140~150 mm/min 时, 硬化层深度为 2.5~3 mm。另外, 火孔直径大, 移动速度要大些。火孔与水孔间距对硬化层深度的最佳值为 10~20 mm, 水孔应有  $15^\circ\sim 30^\circ$  倾角防止影响火焰稳定。火焰加热速度取决于火焰功率, 火焰功率取决于喷嘴尺寸和气体消耗量。喷嘴单位长度上的火焰功率约为 180~350 L/( $cm^2 \cdot h$ )。气体消耗量随工件淬硬层深度提高而增加(表 3-7)。

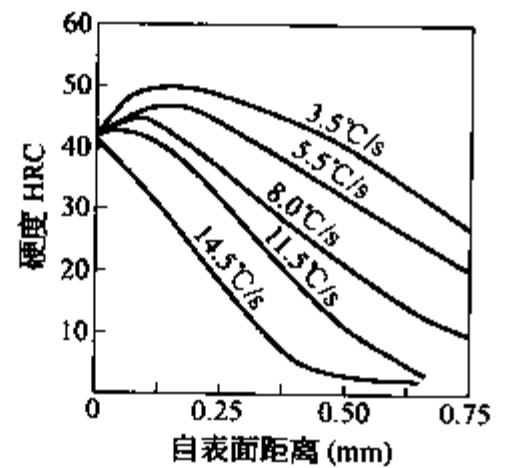


图 3-11 加热速度与硬化层深度的关系

表 3-6 喷嘴移动速度和工件淬硬层之间的关系(火焰温度一定)

火焰喷嘴移动速度(mm/min)	50	75	100	125	150	175
淬硬层深度(mm)	8.0	6.4	4.8	3.2	1.6	0.8

表 3-7 火焰淬火硬化层深度与气体消耗量的关系

硬化层深度(mm)	8	6	5	3	1.5
$C_2H_2$ 消耗量( $cm^3/cm^2$ )	3 300	3 200	1 650	1 300	1 060
$O_2$ 消耗量( $cm^3/cm^2$ )	3 600	3 350	1 760	1 400	1 180

一般, 加热工件表面积  $1 cm^2$ , 当淬硬层深度为 0.8 mm 和 6.0 mm 时,  $O_2$  和  $C_2H_2$  均消耗 0.43 L 和 2.2 L。注意, 火焰淬火加热面积通常在  $1\sim 21 cm^2$  范围。

(3) 工件的预热和预处理: 为取得最佳的结果, 轧制的钢, 经正火或空冷淬火和淬火回火作预处理, 复杂件和  $w_c > 0.40\%$  的工件应作去应力( $175\sim 240^\circ C$ )处理, 可减小畸变和开裂的危险。工件的预热是有利的。

(4) 冷却方法和介质: 根据工件材料、工件形状尺寸确定冷却介质、压力和流量。一般碳钢、合金钢和小件采用水、油和聚乙烯醇水溶液等作介质, 相应介质温度范围为  $15\sim 35^\circ C$ 、 $40\sim 80^\circ C$  和  $20\sim 40^\circ C$  (采用油时应特

别强调安全)。高合金钢或大型工件则采用压缩空气冷却。

(5) 回火和后续工序:按材料、图样技术要求确定回火温度和时间,回火应及时进行(一般在4 h内进行,回火时间1~2 h)。应用在150~200℃之间的火焰回火有高的成品质量,这时的喷枪具有较低的热量输出。6.4 mm淬硬层的大件能自热回火。后续工序一般包括变形检查、校正、探伤和清理等。一般磨削工件在磨后应再行回火。

4) 操作安全 淬火操作中还应注意工件的正确装夹以及操作安全(表3-8)。

表3-8 火焰淬火的安全

项 目	说 明
防止乙炔爆炸	温度>300℃,压力增至0.15~0.2 MPa时会爆炸,空气和氧气中乙炔含量达2.8%~8%和2.8%~9.3%时,有明火会立即爆炸
乙炔不可长期接触铜、银	如长期接触时会产生乙炔铜、乙炔银爆炸性化合物,受剧烈振动或加热到110~120℃时会爆炸
不可使用粉末状电石	电石常用粒度为15~18 mm,粉末状电石遇水会强烈分解过热而爆炸
乙炔管道输送要求	管径 $\geq\phi 50$ mm,工作压力在0.01~0.15 MPa,流速小于800 mm/s
乙炔发生器使用要求	安装逆止阀;保持工作场地的距离,并与氧气瓶分开放置
氧气瓶使用要求	在阴凉处直立放置,不受剧烈振动,安装瓶阀和减压阀,禁止油脂污染

#### 4. 火焰加热表面淬火的质量检验(表3-9)

表3-9 火焰淬火的质量检验

检 验 项 目	检 验 内 容
外 观	淬火表面不应有过烧、熔化和裂纹。用放大镜肉眼观察、超声波探伤或渗透法检查
表面硬度	可应用洛氏硬度、维氏硬度、肖氏硬度、超声波硬度或里氏硬度检验。前三种允许波动范围见表3-10,钢和铸铁火焰淬火后硬度见表3-11
有效硬化层深度	按材料和技术要求以及GB/T5617测定。测定深度波动范围按JB/T9200中表13规定。如对大于2.5~3.5 mm硬化层深度的单件和同一批的波动范围分别为0.6 mm和0.8 mm
硬化区范围	按技术文件规定的表面硬化区而定或按规定的允许误差检验。整体表面淬火的板件,非淬硬边缘和轴件非淬硬端部不大于10 mm;大型工件允许有软带,宽度不大于10 mm,软带间距不大于100 mm
显微组织	按材料和技术性能要求为正常的淬火组织或淬火回火组织
畸 变	应用百分表、直尺、塞尺等和适当仪器进行测量。变形量应不影响材料的机加工质量和性能。允许校正和其后去除应力处理

表3-10 火焰淬火重要件、一般件表面硬度波动范围

检验硬度类别	洛氏硬度 HRC				维氏硬度 HV				肖氏硬度 HS			
	单件		同批件		单件		同批件		单件		同批件	
测定硬度范围	≤50	>50	≤50	>50	≤500	>500	≤500	>500	≤80	>80	≤80	>80
重要件允许波动	≤5	≤4	≤6	≤5	≤55	≤85	≤75	≤105	≤6	≤8	≤8	≤10
一般件允许波动	≤6	≤5	≤7	≤6	≤75	≤105	≤95	≤125	≤8	≤10	≤10	≤12

表 3-11 钢和铸铁件火焰淬火后的硬度值(AISI)

材料	牌 号	受冷却剂影响的典型硬度 HRC			材料	牌 号	受冷却剂影响的典型硬度 HRC		
		空气 <sup>①</sup>	油 <sup>②</sup>	水 <sup>③</sup>			空气 <sup>①</sup>	油 <sup>②</sup>	水 <sup>③</sup>
碳素结构钢	1025 - 1035	—	—	33~50	合金钢	4640	52~56	52~56	60~63
	1040 - 1050	—	52~58	55~60		52100	55~60	55~60	62~64
	1055 - 1075	50~60	58~62	60~63		6150	—	52~60	55~60
	1080 - 1095	55~62	58~62	62~65		8630 - 8640	48~53	52~57	58~62
	1125 - 1137	—	—	45~55		8642 - 8660	55~63	55~63	62~64
	1138 - 1144	45~55	52~57 <sup>④</sup>	55~62	渗碳合金钢 <sup>④</sup>	3310	55~60	58~62	63~65
	1146 - 1151	50~55	55~60	58~64		4615 - 4620	58~62	62~65	64~66
渗碳碳钢 <sup>④</sup>	1010 - 1020	50~60	58~62	62~65	马氏体不锈钢	410, 416	41~44	41~44	—
	1108 - 1120	50~60	60~63	62~65		414, 431	42~47	42~47	—
合金钢	1340 - 1345	45~55	52~57 <sup>④</sup>	55~62		420	49~56	49~56	—
	3140 - 3145	50~60	55~60	60~64		440(典型)	55~59	55~59	—
	3350	55~60	58~62	63~65	铸铁 (AS TM)	Class 30	—	43~48	43~48
	4063	55~60	61~63	63~65		Class 40	—	48~52	48~52
	4130 - 4135	—	50~55	55~60		Class 45010	—	35~43	35~45
	4140 - 4145	52~56	52~56	55~60		50007, 53004, 60003	—	52~56	55~60
	4147 - 4150	58~62	58~62	62~65		Class 80002	52~56	56~59	56~61
	4337 - 4340	53~57	53~57	60~63		Class 60 - 45 - 15	—	—	35~45
4347	56~60	56~60	62~65						

注：① 加热过程中，未直接加热区必须保持相对冷态，才能获得表中的硬度值。  
 ② 薄壁部位油淬或水淬时易有开裂敏感倾向。  
 ③ 旋转或旋转-连续方法处理材料的硬度比连续或固定式方法处理件的硬度值稍低。  
 ④ 渗碳件表面  $\alpha_c$  0.90%~1.10% 时的硬度值。

5. 实际应用

1) 车床主轴淬火 主轴材料为 45 钢，尺寸为  $\phi 65 \text{ mm} \times 1386 \text{ mm}$ 。淬火工艺：采用 3 只 9 孔喷嘴加热；工件旋转速度为 105 r/min；相对移动速度为 143 mm/min；淬火介质为 15~25℃ 水；氧气工作压力为 273~392 kPa；乙炔工作压力为 89~96 kPa；喷嘴距离 10 mm。淬火后硬度为 50~54 HRC。

2) 钻探机械钻具锁接头 ( $\phi 65 \text{ mm}$ ) 材料为 45 钢，要求淬硬层深度为 2.0~2.5 mm，表面硬度大于 50 HRC。

淬火工艺：加热温度 850~870℃；氧气压力 0.7~0.8 MPa；乙炔压力 0.05~0.15 MPa；自喷水冷淬火，水压、水量调到既不熄灭火又能淬硬为准；专用喷嘴  $\phi 0.8 \times 31 \times 2$  排孔；水孔  $\phi 10 \times 31 \times 3$  排孔；火距 10 mm；机床转速 0.85 r/min。

工件横放顶紧在淬火机床两顶尖间，火焰对准淬火部位。

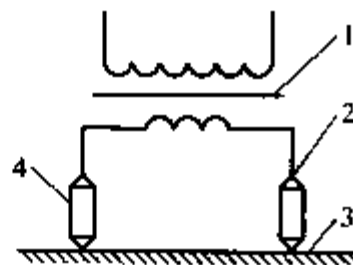


图 3-12 接触电阻加热表面淬火原理

1—变压器；2,4—铜电极轮；3—工件

二、接触电阻加热淬火

1. 概述

接触电阻加热淬火主要应用于机床铸铁导轨表面强化处理。其工艺原理和主要应用见表 3-12。其工艺原理见图 3-12。

表 3-12 接触电阻加热淬火的工艺原理和主要应用

工 艺 原 理	主要应用场合
利用触头(铜质滚轮)和工件间的接触电阻在通电条件下使工件表面加热(低电压大电流)奥氏体化,并借其本身未加热部分的热传导实现淬火冷却	应用于大型零件、重型机床导轨;在机床导轨维修中尤为普遍

2. 处理工艺参数和设备

接触电阻加热淬火处理前的技术要求和工艺参数见表 3-13。

表 3-13 接触电阻加热淬火处理前的技术要求和工艺参数

项 目	内 容 说 明
工件处理前技术要求	1) 工件淬火表面粗糙度 $Ra$ 1.6~3.2 $\mu m$ 2) 工件淬火表面硬度: 工件质量 $\leq 3 t$ 时不低于 190 HB; 工件质量 $> 3 t$ 时不低于 180 HB 3) 工件基体中珠光体含量 $\leq 90\%$ , 片间距 $\geq 2 \mu m$
处理工艺参数	1) 电极触头滚轮用黄铜或纯铜制造, 轮周花纹有 S 形、锯齿形和鱼鳞形等, 最好有冷却系统 2) 轮径一般取 50~60 mm, 轮周花纹宽度 0.8~1.0 mm, 移动速度 2~3 m/min; 电流 400~600 A, 次级开路电压 $< 5 V$ , 负载电压为 0.5~0.6 V (3) 铜轮上压力为 40~60 N

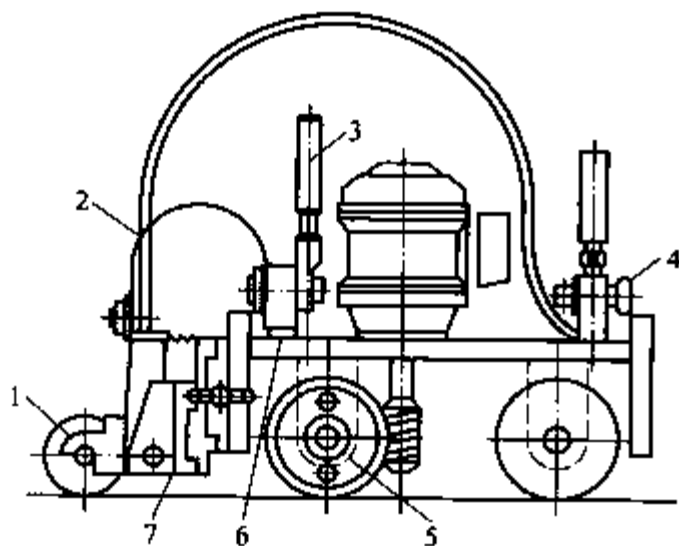


图 3-13 行星差动式淬火机结构

1—铜电极轮; 2—柔性导线; 3—接变压器导线;  
4—风门; 5—行星减速器; 6—绝缘垫; 7—电木座

接触电阻加热淬火机有行星差动式、可移自动往复式、传动电极式、多轮式等。图 3-13 表示行星差动式设备结构。

3. 质量检验

工件淬火后的质量合格与否的主要依据是耐磨性。硬化区显微组织主要是隐晶马氏体加少量残留奥氏体, 不含莱氏体和较多量残留奥氏体。精整过的淬硬表面按淬火条纹六级评级图评定(图表见 JB/T6954)。工件淬火后的合格质量要求见表 3-14。

三、脉冲淬火

1. 概述

脉冲淬火的一般定义、主要特点和处理方法见表 3-15。

表 3-14 工件淬火后合格质量的要求

项 目	具 体 说 明
淬硬条纹排列	排列力求整齐, 不允许出现纵向软带(沿摩擦副运动方向, 连续长度在 20 mm 以上没淬硬条纹区); 淬硬条纹起始和终止位置公差 $\geq 10 mm$
淬硬表面精度和粗糙度	符合图样技术要求
淬火条纹评级	按 JB/T6954—2007, 2~4 级为合格, 对应显微组织评级按 JB/T6954 图 2 评级
淬硬面积	不小于需淬火表面的 25%, 具体参见 JB/T6954—2007
打火烧伤凹坑(过热组织)	直径 $d \geq 1 mm$ , 在任意 100 $cm^2$ 面积内, $d > 0.2 mm$ 凹坑不得多于 3 个
工件淬硬层深度 $H$	精整后 $H \leq 0.18 mm$ ; 评定时取代表部位, 用 4% 硝酸酒精腐蚀, $\times 100$ ; 取淬硬层最深处测量
淬硬条纹横截面硬度	显微硬度值 $\leq 550 HV0.1$ (条纹交接区除外), 负荷采用 0.98 N

表 3-15 脉冲淬火的定义、处理特点和处理方法

项 目	说 明 内 容
定 义	应用高功率密度的脉冲能束使工件表层加热奥氏体化, 热量随即在极短时间内传入工件内部, 并利用自冷淬火。有时可应用外界冷却方法

(续表)

项 目	说 明 内 容
主要特点	1) 高功率密度加热 2) 加热速度快,可达 $10^4 \sim 10^6$ °C/s 3) 加热相变温度提高 4) 淬火后的工件几乎不畸变 5) 晶粒非常细小,硬度提高 6) 耐磨性、断裂韧度和疲劳强度显著提高
处理方法	高频脉冲感应加热淬火,超高频脉冲感应加热淬火,脉冲电源直接加热淬火,电子束淬火,激光淬火(见激光热处理)

## 2. 处理方法和结果

1) 高频脉冲感应加热淬火 主要工艺参数见表 3-16。其常用设备的振荡频率为 200~300 kHz,对模数小于 1 mm 的齿轮有的可使用 1 000 kHz。我国高频感应加热常用的频率为 250 kHz,因而这种脉冲感应加热淬火介于超高频和普通高频感应淬火之间。另外,由于加热工件常较大,淬火时一般要求浸冷或喷冷,但其畸变仍保持很小,显微组织、淬硬层、过渡区情况及应用实例见表 3-17 和表 3-18。

表 3-16 高频和超高频脉冲感应加热淬火工艺参数

处理方法	振荡频率	功率 (kW)	加热面积 (cm <sup>2</sup> )	加热时间 (s)	加热功率密度 (kW/cm <sup>2</sup> )	加热速度 (°C/s)	淬硬深度 (mm)
高频方法	200~300 kHz	>100	1~10	0.2~0.6	约 5	$10^5$	1
超高频方法	27.12 MHz		0.1~1	0.001~0.1	10~30	$10^4 \sim 10^5$	0.05~0.5

表 3-17 高频和超高频脉冲淬火显微组织与性能

处理方法	处理材料	脉冲加热时间	显微组织	性能	淬硬层深	过渡区宽度
高频方法	45	240 ms	大量板条马氏体+少量片状马氏体+一些蝶状马氏体	900 HV0.5 以上 更高抗回火性	0.8 mm	0.3 mm
超高频方法	T10	25 $\mu$ s	极细马氏体+碳化物	940 HV		0
		50 $\mu$ s	板条马氏体+碳化物	940 HV		0
		250 $\mu$ s	片状马氏体+残留奥氏体	940 HV		0

表 3-18 大功率脉冲淬火应用实例

零件类型	材料	淬 火 工 艺				工 艺 效 果
		感应器	加热方法	加热时间	冷却方法	
汽车凸轮	45	仿形	整体加热	0.5 s	喷水	67~68 HRC
小模数齿轮	40Cr	仿形	整体加热	0.7 s	自冷	700 HV
汽车转向齿条	40Cr	环形与齿顶平行	逐齿加热	140 $\mu$ s	自冷	700 HV, 淬硬层浅
汽车转向齿条	40Cr	圆铜线仿齿形	埋水逐齿加热	206 $\mu$ s	埋水冷	840~927 HV, 齿顶未淬硬

注: 脉冲淬火时齿沟不淬硬, 解决了齿条弯曲变形问题。

2) 超高频脉冲感应加热淬火 超高频脉冲感应加热具极强烈的趋肤效应,其主要工艺参数见表 3-16。由于脉冲加热时间短,几乎无热扩散,淬火表层与基体间无过渡带;可以依靠热传导进行自身冷却淬火,畸变量小,可以不必回火;淬火组织硬度很高:  $\omega_c 0.6\% \sim 0.7\%$ 、 $\omega_c 0.7\% \sim 0.9\%$  和 T10 钢相应淬硬层硬度可达 900 HV、950~1 050 HV 和 1 050 HV。应用实例见表 3-19。

表 3-19 超高频脉冲淬火应用举例

工件名称	工件名称	材 料	脉 冲	表面硬度
锯齿类	纺织机针	60	13 $\mu\text{s}$	940 HV
	木工卡锯	65 Mn	82 $\mu\text{s}$	950 HV
	手 锯	T8	50 $\mu\text{s}$	934 HV
刀片类	收割机刀片	80CrV2	100 $\mu\text{s}$	65.5 HRC
	电动剃须刀片	$\omega_{\text{C}} 1.4\%$ 碳钢	6 $\mu\text{s}$	980 HV
齿轮类	精密齿轮	30CrMo	25 $\mu\text{s}$	55.5 HRC
	打火机火石轮	渗碳钢	15 $\mu\text{s}$	66.6 HRC

3) 脉冲电流直接加热淬火 采用 8 000~20 000 A 的脉冲电焊机作加热设备,工件放置在两极之间直接通电进行加热,一般采用自然冷却。设备较为简单,但只适用于形状简单和截面变化不大的工件。

## 第二节 钢 的 渗 碳

### 一、概述

钢的渗碳是为了提高钢工件表层的含碳量并在其中形成一定的碳含量梯度,将工件在渗碳介质中加热、保温,使碳原子渗入的化学热处理工艺。经渗碳及淬火和回火处理后,工件表面可获得高的硬度、强度、耐磨性和疲劳强度,而工件心部仍保持一定强韧性。

渗碳的钢种见表 3-20,常用  $\omega_{\text{C}} 0.1\% \sim 0.25\%$  的碳素和优质碳素结构钢、优质合金结构钢等。

表 3-20 渗碳、碳氮共渗常用钢

钢种类别及标准号	具 体 钢 号
碳素结构钢 GB/T700, 优质碳素结构钢 GB/T699	Q215, Q235, Q255, 08, 10, 15, 20, 25, 15Mn, 20Mn, 25Mn
合金结构钢 GB/T3077	20Mn2, 27SiMn, 20MnV, 15Cr, 20Cr, 15CrMn, 20CrMn, 20CrV, 20CrMnSi, 25CrMnSi, 20CrMnTi, 12CrMo, 15CrMo, 20CrMo, 20CrMnMo, 12CrMoV, 25Cr2MoVA, 20Mn2B, 20MnTiB, 20MnVB, 20SiMnVB, 25MnTiBRE, 20Cr3MoWVA, 20CrNi, 12CrNi2, 12CrNi3, 20CrNi3, 12Cr2Ni4, 20Cr2Ni4, 18Cr2Ni4WA, 25Cr2Ni4WA

### 二、固体渗碳

固体渗碳是指将工件放在填充粒状渗碳剂的密封箱中进行的渗碳。

#### 1. 固体渗碳前的准备工作

固体渗碳前的准备工作见表 3-21。

表 3-21 固体渗碳前的准备工作

工作名称	具 体 说 明
图样审查	审查图样及工艺文件是否齐备和正确,并了解相应技术条件和技术要求
工件准备	工件原始状态;预备热处理;材料;加工余量、表面状态;除锈、清洗
工装准备	工装完好,渗碳罐为工件总体积的 4~7 倍,由低碳钢或耐热钢板焊成

(续表)

工作名称	具体说明
试样准备	材料、状态与工件相同(表面粗糙度 $Ra \geq 3.2 \mu\text{m}$ ); $\phi 10 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ , 3~5 件
设备准备	渗碳用炉有效加热区、工作机构运行符合要求; 冷却设备; 回火设备; 控温合格

## 2. 渗碳工件的防渗、装箱和装炉

(1) 工件需局部防渗部位, 可采用防渗涂料(市售), 加大加工余量(单边留量为渗碳层深度 1 倍以上)和镀致密铜(厚 0.02~0.04 mm 以上)的措施。

市售防渗涂料应按 GB/T9199《防渗涂料技术条件》进行考核, 其中阻硬率考核条件见表 3-22。

表 3-22 防渗碳涂料的阻硬率考核条件

考核条件	示 例
阻硬率 $h \geq 80\%$ $h = \left(1 - \frac{X - Y}{Y}\right) \times 100\%$ 其中, Y 为心部硬度; X 为工件防渗面硬度	如 20CrMnTi 渗碳或碳氮共渗淬火后 Y 为 25 HRC, X 为 30 HRC 则 $h = 80\%$ 合格, 如 $X = 31 \text{ HRC}$ , $h < 80\%$ 不合格

(2) 固体渗碳剂组成和组别划分见表 3-23。固体渗碳剂由供碳剂、催渗剂、填充剂和粘结剂均匀混合而成(按 JB/T9203)。

表 3-23 固体渗碳剂组成和组别划分

组成	材 料	作用 和 具体说明												
供碳剂	木炭	1) 作用: 在渗碳温度下, 持续不断提供足够数量活性碳原子 2) 粒度要求: 为了增加其强度, 不应压碎成粉末, 应加工成不同粒度 <table border="1" style="margin: 10px auto;"> <thead> <tr> <th>粒度组别</th> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>颗粒尺寸(mm)</td> <td>0.5~1.5</td> <td>&gt;1.5~3.0</td> <td>&gt;3.0~6.0</td> <td>&gt;6.0~9.0</td> <td>&gt;9.0~12.0</td> </tr> </tbody> </table> 3) 注意: 颗粒粗, 强度高, 导热快, 但活性较低; 对大而重的渗碳件可混入强度更高的焦炭颗粒, 但活性较差些, 通常粒度为 0.5~6.0 mm	粒度组别	1	2	3	4	5	颗粒尺寸(mm)	0.5~1.5	>1.5~3.0	>3.0~6.0	>6.0~9.0	>9.0~12.0
粒度组别	1	2	3	4	5									
颗粒尺寸(mm)	0.5~1.5	>1.5~3.0	>3.0~6.0	>6.0~9.0	>9.0~12.0									
催碳剂	BaCO <sub>3</sub>	1) 作用: 提高供碳剂析出活性碳原子能力, 增加渗碳箱内 CO 和 CO <sub>2</sub> 的分压; 在渗碳后的冷却过程中, 催碳剂的金属氧化物与 CO <sub>2</sub> 反应而还原再生, 减少损耗 2) BaCO <sub>3</sub> 含量组别: <table border="1" style="margin: 10px auto;"> <thead> <tr> <th>组 别</th> <th>I</th> <th>II</th> <th>III</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>含量(质量分数, %)</td> <td>3~7</td> <td>&gt;7~12</td> <td>&gt;13~17</td> </tr> </tbody> </table>	组 别	I	II	III	含量(质量分数, %)	3~7	>7~12	>13~17				
组 别	I	II	III											
含量(质量分数, %)	3~7	>7~12	>13~17											
填充剂	CaCO <sub>3</sub> 或 焦炭小粒	1) 作用: 防止渗碳过程中渗碳剂烧结成块 2) 加入数量 $\geq 2\%$												
粘结剂	糖浆或淀粉	1) 作用: 使催渗剂与木炭颗粒较牢固粘结起来, 混合均匀 2) 未规定其含量, 可根据情况适量添加												
杂 质		水分 $\leq 4\%$ ; 硫 $\leq 0.04\%$ ; SiO <sub>2</sub> $\leq 0.2\%$ ; 挥发物 $\leq 8\%$ (质量分数)												

固体渗碳剂的选择: 一般要求工件表面含碳量浓度高, 渗层深的选用活性高的渗剂; 对含碳化物形成元素的钢, 宜选用活性略低的渗剂。



(3) 渗碳工件的装箱与装炉：装箱与装炉步骤说明见表 3-24。

表 3-24 固体渗碳的装箱与装炉

工序名称	具体说明
工件装箱	1) 渗碳箱底垫一层 30~40 mm 厚的渗剂,将要求渗层深度相同的工件整齐平放 2) 工件箱壁、工件之间间距一般保持 10~15 mm,层间距保持 20~30 mm 3) 填入拌和均匀的渗剂,稍加捣实,稳定支撑工件和减少空隙 4) 工件与渗碳箱盖间距 30~50 mm,填入渗碳剂 5) 必要时,渗碳箱内可放置金属或陶瓷支架或隔条,垂直吊挂长形工件 6) 放置内试样几只( $\phi 10$ mm $\times 25$ mm)作最终检验 7) 渗碳箱盖孔中插入中间检验的外试样( $\phi 10$ mm $\times 200/250$ mm),插入渗剂 100 mm
渗碳箱装炉	1) 入炉温度不低于 800℃,以后随炉加热至渗碳温度 2) 渗碳箱放置于有效加热区内,一般与炉墙距离保持 100~150 mm,与炉门距离大于 200 mm 3) 同炉中,渗碳层深要求大的渗碳箱应放在炉子后部

### 3. 固体渗碳工艺操作

固体渗碳温度、时间、冷却和渗后热处理见表 3-25。

表 3-25 固体渗碳及渗后热处理

工艺参数	具体说明																																																																								
渗碳温度	1) 一般为 900~950℃,渗层要求较浅的,取温度下限 2) 渗碳箱装炉后在 800~850℃进行透烧,以保证渗碳箱内温度均匀: <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th>渗碳箱尺寸(直径<math>\times</math>高)(mm)</th> <th><math>\phi 250 \times 450</math></th> <th><math>\phi 350 \times 450</math></th> <th><math>\phi 350 \times 600</math></th> <th><math>\phi 450 \times 450</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>透烧时间(h)</td> <td>2.5~3</td> <td>3.5~4</td> <td>4~4.5</td> <td>4.5~5</td> </tr> </tbody> </table>	渗碳箱尺寸(直径 $\times$ 高)(mm)	$\phi 250 \times 450$	$\phi 350 \times 450$	$\phi 350 \times 600$	$\phi 450 \times 450$	透烧时间(h)	2.5~3	3.5~4	4~4.5	4.5~5																																																														
渗碳箱尺寸(直径 $\times$ 高)(mm)	$\phi 250 \times 450$	$\phi 350 \times 450$	$\phi 350 \times 600$	$\phi 450 \times 450$																																																																					
透烧时间(h)	2.5~3	3.5~4	4~4.5	4.5~5																																																																					
渗碳时间 $t$ (平均渗速可按 0.10~0.15 mm/h 估算)	1) 渗碳时间与渗碳温度、渗层深度和材料相关 2) 渗碳时间与渗碳温度、渗碳层深度的关系: <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <thead> <tr> <th><math>t</math> (h) \ 渗碳层深度 (mm)</th> <th>0.4</th> <th>0.8</th> <th>1.2</th> <th>1.6</th> <th>2.0</th> <th>2.4</th> <th>2.8</th> <th>3.2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>渗碳温度(℃)</th> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>870</th> <td>3.5</td> <td>7</td> <td>10</td> <td>13</td> <td>16</td> <td>19</td> <td>22</td> <td>25</td> </tr> <tr> <th>900</th> <td>3</td> <td>6</td> <td>8</td> <td>10</td> <td>12</td> <td>14</td> <td>16</td> <td>18</td> </tr> <tr> <th>930</th> <td>2.75</td> <td>5</td> <td>6.5</td> <td>8</td> <td>9.5</td> <td>11</td> <td>12.5</td> <td>14</td> </tr> <tr> <th>955</th> <td>2</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>7</td> <td>8.5</td> <td>11</td> <td>11.5</td> </tr> <tr> <th>985</th> <td>1.5</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>7</td> <td>8</td> <td>9</td> </tr> <tr> <th>1010</th> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>	$t$ (h) \ 渗碳层深度 (mm)	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	渗碳温度(℃)									870	3.5	7	10	13	16	19	22	25	900	3	6	8	10	12	14	16	18	930	2.75	5	6.5	8	9.5	11	12.5	14	955	2	4	5	6	7	8.5	11	11.5	985	1.5	3	4	5	6	7	8	9	1010	1	2	3	4	5	6	7	8
$t$ (h) \ 渗碳层深度 (mm)	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2																																																																	
渗碳温度(℃)																																																																									
870	3.5	7	10	13	16	19	22	25																																																																	
900	3	6	8	10	12	14	16	18																																																																	
930	2.75	5	6.5	8	9.5	11	12.5	14																																																																	
955	2	4	5	6	7	8.5	11	11.5																																																																	
985	1.5	3	4	5	6	7	8	9																																																																	
1010	1	2	3	4	5	6	7	8																																																																	
冷却	1) 工件随渗碳箱一起出炉空冷至室温后出箱 2) 工件随渗碳箱一起降温至 840~860℃,保温一定时间后出炉空冷至室温出箱,以便降低表面碳浓度,加厚渗层或对细晶粒钢从箱中取出直接淬火等																																																																								
淬火回火	1) 一次重新加热淬火+低温回火 2) 二次重新加热淬火+低温回火 3) 高温回火 600~680℃+一次重新加热淬火+低温回火 4) 二次重新加热淬火+冷处理+低温回火 5) 感应加热淬火+低温回火(可参考表 3-35)																																																																								

4. 固体渗碳应用实例

机床变速箱齿轮 ( $m=3\text{ mm}$ ) 渗碳淬火的工艺曲线如图 3-14。

材料: 20Cr;

技术要求: 渗碳层深度  $0.7\sim 1.1\text{ mm}$ , 硬度  $58\sim 63\text{ HRC}$ ;

渗碳剂: 木炭  $97\% + \text{BaCO}_3 3\%$  (质量分数)。

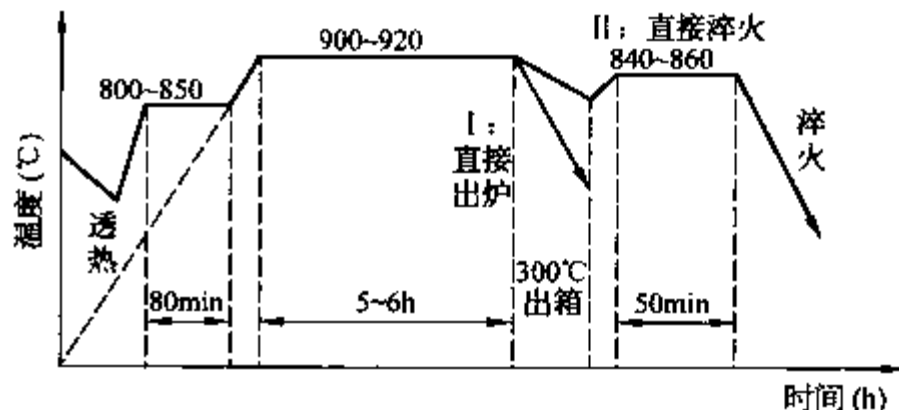


图 3-14 机床变速箱齿轮渗碳淬火工艺曲线

三、气体渗碳

气体渗碳是指钢铁工件在含碳气体中进行的渗碳。应用可控气氛进行气体渗碳是按渗碳各阶段的碳势要求,对炉气成分进行调节。碳势是指气氛与钢铁表面达到动态平衡时,钢表面的碳含量值。它反映炉气渗碳能力的强弱。

1. 气体渗碳前的准备工作

气体渗碳前的准备工作(除表 3-21 所述的工作外)见表 3-26。

表 3-26 气体渗碳前的准备工作

工作名称	具体说明
工装和设备	适用的料筐、吊具、挂具、料盘;定型井式炉、多用炉、连续式炉,相应的进料机构等
准备	运行可靠,控温,控制碳势装置及检查。冷却设备,回火设备运行及检查等
渗剂准备	<p>根据所用渗碳气体的产生方法分滴注式、吸热式和氨基气氛</p> <p>1) 滴注式:把含碳有机液体(一般用甲醇)在一定温度密封良好的炉内裂解作为渗碳载气(稀释气),添加乙酸乙酯、丙酮、异丙醇、煤油等可作为渗碳气氛,国内采用煤油较多。煤油有 1 号灯用煤油、航空煤油和一号渗碳油。相关这些渗碳剂的主要成分和特点见表 3-27。单独使用煤油易形成炭黑,可应用煤油+乙醇和煤油+甲醇,有利于减少炭黑。常用气体渗碳剂的选用见表 3-28 和表 3-29。应用甲醇+丙酮,不易产生炭黑;应用甲醇+乙酸乙酯,称 Carbo-Magg(I)法</p> <p>2) 吸热式气氛:将气体燃料和空气以一定比例混合,在一定温度、催化剂作用下通过吸热反应裂解生成的气氛,可燃、易爆和具还原性,作渗碳时的载气。富化气常用甲烷或丙烷。几种吸热式气氛组成见表 3-30</p> <p>3) 氨基气氛:一般指含氮在 90% 以上的混合气体,可作为渗碳时的载气。常用的氨基气氛组成见表 3-31。另外要添加碳氮化合物的富化气</p>
装炉	<p>1) 工件装挂,应保持一定距离(5~10 mm),保证气体畅通</p> <p>2) 防渗部位的检查</p> <p>3) 代表性位置放上试样 2~3 个</p> <p>4) 工件应除油污、锈蚀等</p> <p>5) 按材质、技术要求分装</p>

表 3-27 几种常用气体渗剂及气体(摘自 JB/T9209)

渗剂名称	主要成分	特点
丙烷 $\text{C}_3\text{H}_8$ 丁烷 $\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{C}_3\text{H}_8, \text{C}_4\text{H}_{10} > 90\%$ (体积分数), 烯烃 $\leq 5\%$ , $\text{C}_5$ 以上烃 $\leq 2\%$ , $\text{H}_2\text{S} \leq 0.29\text{ g/m}^3$ , 无游离水分	易燃易爆物质,气态相对密度为空气的 1.5 倍,爆炸下限较低(2%左右),储存、使用中须采取安全措施
航空煤油 ( $\text{C}_9\sim\text{C}_{14}$ 烷烃) 灯用煤油 ( $\text{C}_{11}\sim\text{C}_{17}$ 烷烃)	主要含石蜡烃、烷烃及芳香烃,芳香烃 $10\%\sim 20\%$ , $\text{S} \leq 0.04\%$ , 无水溶性酸或碱	$< 800^\circ\text{C}$ 热分解时, $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ 和 $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ 和 $\text{H}_2$ 皆在 $20\%\sim 40\%$ 之间,分解不充分,易产生炭黑和焦炭; $> 800^\circ\text{C}$ , 脱氢反应明显增加, $\text{H}_2$ 迅速上升,在 $900\sim 950^\circ\text{C}$ 较高温度渗碳,才获得较好的结果

(续表)

渗剂名称	主要成分	特点
1号渗碳油	含 S ≤ 0.04%, 芳香烃 ≤ 7%, 少量阻聚剂	渗碳速度比煤油快, 生成炭黑较少, 缩程干点不高于 255℃ (煤油干点不高于 300℃)
甲醇 CH <sub>3</sub> OH	纯度 ≥ 99.5%, 水 < 0.3%	弱渗碳气氛, 常用作稀释气体 (参见 GB/T683), 有毒
乙醇 C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	纯度 ≥ 90%, 水 < 0.5%	无色透明挥发液体 (参见 GB/T678)
异丙醇 (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CHOH	纯度 ≥ 98.5%, 水 < 0.3%	这类有机滴注剂分子结构简单, 高温下易裂解, 形成炭黑少, 与 CH <sub>3</sub> OH 一定比例同时滴入炉内能实行可控渗碳
丙酮 (CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> )	纯度 ≥ 99%, 水 < 0.5%	
醋酸乙酯 (CH <sub>3</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )	纯度 ≥ 98%, 水 < 0.4%	
氨气 (NH <sub>3</sub> )	纯度 ≥ 99.5%, 水和油杂质 ≤ 5%, 干燥后水 < 1%	无色气体, 强烈刺激气味, 对人眼和呼吸器管有伤害作用 (参见 GB536)
甲酰胺 NCONH <sub>2</sub>	纯度 ≥ 99%	在热分解时, 产生极毒的 HCN (空气中含量不允许 ≥ 0.3 mg/m <sup>3</sup> )
三乙醇胺 (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OH) <sub>3</sub> N	含胺量 99%~110%, 三乙醇胺含量 ≥ 75%	
尿素 (NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO	工业用含氮 ≥ 46%, 水 ≤ 0.5%	(参见 GB2440)
氯化铵 NH <sub>4</sub> Cl	纯度 ≥ 99.3%, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ≤ 0.02%, 水不溶物 < 0.02%	(参见 GB/T2946)
氮气 N <sub>2</sub>	纯度 ≥ 99.5%, O <sub>2</sub> ≤ 0.5%, 游离水每瓶内 ≤ 100 mL	II类1级 (参见 GB/T3864) 无色、无味、无嗅、无毒中性气体
氩气 Ar	纯度 ≥ 99.99%, O <sub>2</sub> ≤ 2 × 10 <sup>-3</sup> %, H <sub>2</sub> O ≤ 2 × 10 <sup>-3</sup> %	无色、无味、无嗅、无毒惰性气体 (参见 GB/T4842)

表 3-28 常用气体渗碳剂的选用原则

项 目	具 体 内 容
渗碳剂的选用原则	不单独用一种液体, 常用两种有机液体, 一种液体高温分解后相当于稀释气体作载气, 另一种高温分解后, 作渗碳气, 如甲醇+煤油
碳氧比 (渗碳剂中碳和氧原子数之比) C/O (表 3-29)	1) $\frac{C}{O} > 1$ , 作渗碳剂, 值越大, 高温析出原子碳越多, 渗碳能力越强; 如要作稀释剂, 常加水稀释, 使 $\frac{C}{O} = 1$ 2) $\frac{C}{O} = 1$ , 作稀释剂 (即载气), 高温析出 CO、H <sub>2</sub> 较多 3) 不含氧的苯、煤油等高温裂解出大量活性碳原子, 作渗碳剂时, 易产生大量炭黑和煤焦油, 常加甲醇、乙醇等有机物以使其高温裂解后对其加以稀释
碳当量 (表 3-29)	产生 1 mol 碳所需要该物质的质量, 即为碳当量, 碳当量越小, 该物质的渗碳能力越强
便于控制和调节炉气碳势	以甲醇作为稀释气体, 以乙酸乙酯、乙酸甲酯、丙酮作渗碳剂, 常用氧探头、红外仪和露点仪能较好地控制炉气
形成炭黑的倾向性小	渗碳剂高温裂解时生成的不饱和烯烃类越少越好, 以免生成炭黑和结焦; 热分解时, 常用烷烃高而烯烃低的有机渗剂为宜

表 3-29 常用有机溶液的碳氧比和碳当量

名称	分子式	C/O 比	碳当量(g/mol)	产气量(mL <sup>-1</sup> )	用途
甲醇	CH <sub>3</sub> OH	1	64	1.66	稀释剂
乙醇	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	2	46	1.55	渗碳剂
异丙醇	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> OH	3	30	—	强渗碳剂
乙醚	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	4	24.7	—	强渗碳剂
丙酮	CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub>	3	29	1.22	强渗碳剂
乙酸乙酯	CH <sub>3</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	2	44	—	渗碳剂
煤油	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	—	28.25	0.73	强渗碳剂

表 3-30 几种吸热式气氛的组成

原料气	混合比 空气:原料气	气氛组成(体积分数,%)						
		CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
天然气	2.5	0.3	0	0.6	0.4	20.9	40.7	余量
城市煤气	0.4~0.6	0.2	0	0.12	0~1.5	25~27	41~48	余量
丙烷	7.2	0.3	0	0.6	0.4	24.0	33.4	余量
丁烷	9.6	0.3	0	0.6	0.4	24.2	30.3	余量

表 3-31 常用的氨基气氛组成

气氛	成分(体积分数,%)					露点 (°C)	备注
	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>		
N <sub>2</sub> +CH <sub>3</sub> OH+ 富化气(剂)	15~20 18~23	35~45 27~45	0.3	0.4 0.1~0.3	余 37~47	0 0	Endomix 法(美) <sup>①</sup> UCAR 法(美) ALNAT-C 法(法)
N <sub>2</sub> +C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> +空气	4~6	8~10	0.8~1.5	0.04~0.1	≈85	≈-20	NCC 系统(英)
N <sub>2</sub> +CH <sub>4</sub> +CO <sub>2</sub>	2~4	10~12	3~5	0.02~0.6	≈80	≈-40	CAP 系统(美) <sup>②</sup>
N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> +碳氢化合物	15~20	40~50	2~5	0.12	35~40	-6.7	
N <sub>2</sub> +C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (或 CH <sub>4</sub> )	0.4 0.1		15	0.024 0.01	余		渗碳扩散,CH <sub>4</sub> 的含 量为零

注: ① Endomix 法(美) N<sub>2</sub> 40%+CH<sub>3</sub>OH 60%, 添加天然气 CH<sub>4</sub> 或 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, 炉内裂解形成接近吸热式气氛(XQ20)的成分(H<sub>2</sub> 40%+N<sub>2</sub> 40%+CO 20%)。另外 Carbo-Magg(II)法: N<sub>2</sub> 40%+CH<sub>3</sub>OH 60%, 添加丙酮, 其成分也接近吸热式气氛(H<sub>2</sub> 40%+N<sub>2</sub> 40%+CO 20%)。

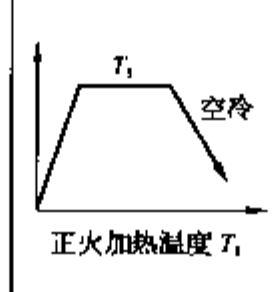
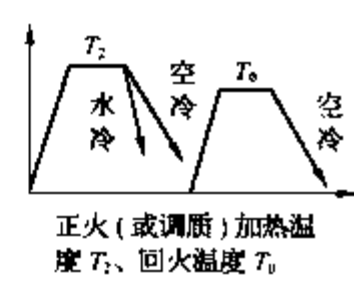
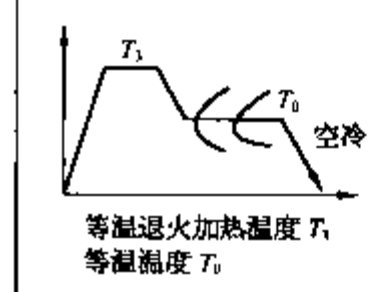
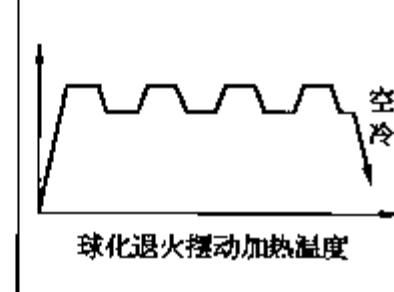
② CAP 系统: CAP1 系统(碳氢化合物采用天然气)混合气体组成(体积分数)为 N<sub>2</sub> 80%, CH<sub>4</sub> 17%, CO<sub>2</sub> 3%; CAP2 系统(碳氢化合物采用丙烷)混合气体组成(体积分数)为 N<sub>2</sub> 85%, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> 3%, 空气 12%。

常用渗碳钢的预备热处理工艺及处理后的硬度见表 3-32。

## 2. 气体渗碳工艺参数

渗碳温度、时间、炉气调节、冷却等参数见表 3-33。

表 3-32 常用渗碳钢预备热处理工艺及处理后硬度

钢 号	正 火 (处理后硬度 HBS)	正火+回火 (处理后硬度 HBS)	等温退火 (处理后硬度 HBS)	球化退火 (处理后硬度 HBS)
工艺曲线	 正火加热温度 $T_1$	 正火(或调质)加热温 度 $T_2$ 、回火温度 $T_0$	 等温退火加热温度 $T_1$ 等温温度 $T_0$	 球化退火摆动加热温度
10、20	$T_1$ 900~960℃ (160~190)			
15Cr、20Cr	$T_1$ 900~950℃ (179~217)	$T_2$ 880~940℃ 水冷 $T_0$ 600~650℃ (156~179)		
20CrMo	$T_1$ 930~950℃ (179~217)			
20CrMnTi	$T_1$ 950~970℃ (179~217)			
20MnV 20MnTiB 20MnVB	$T_1$ 950~970℃ (179~217)			
15CrMnMo 20CrMnMo		$T_2$ 880~940℃ $T_0$ 650~680℃ (180~230)		
12CrNi3 12Cr2Ni4		$T_2$ 900~940℃ $T_0$ 640~660℃ (207~269)	$T_3$ 950~1050℃ 炉冷 $T_0$ 620~630℃ (150~207)	
20CrNi3 20Cr2Ni4		$T_2$ 880~940℃ $T_0$ 650~680℃ (207~269)		
20Cr2Ni4 18Cr2Ni4WA		回火 620~660℃ 空冷 $T_2$ 900~940℃ $T_0$ 660~700℃ (220~280)		
19CrNi5			$T_3$ 890~970℃、1~2 h 空冷, $T_0$ 620~630℃ (≤200)	
19MnCr5			$T_3$ 940~980℃ 加热时间 20~30 min/cm $T_0$ 620~650℃ (140~185)	710~740℃ 加热时间 20~30 min/cm (≤179)

(续表)

钢 号	正 火 (处理后硬度)	正火+回火 (处理后硬度 HBS)	等温退火 (处理后硬度 HBS)	球化退火 (处理后硬度 HBS)
16MnCr5			T <sub>3</sub> 920~1 050℃ 加热时间 20~30 min/cm T <sub>0</sub> 620~650℃ (140~185)	冷挤压软化退火: 720℃, 6h, 炉冷至 680℃, 2 h, 炉冷 至 550℃ 出炉(112~121)
20MnCrS5			T <sub>3</sub> 920~1 050℃ 加热时间 20~30 min/cm T <sub>0</sub> 620~650℃ (140~185)	710~740℃ 加热时间 20~30 min/cm (≤179)
18CrMo4	T <sub>1</sub> 880~930℃ 加热时间 2~3 min/cm (≤210)		T <sub>3</sub> 940~980℃ 加热时间 2~3 min/cm T <sub>0</sub> 630~650℃ (140~185)	

表 3-33 气体渗碳工艺参数

工序及 处理参数	具 体 说 明																																																																																																						
渗碳温度	1) 一般为 900~950℃ 2) 渗碳温度较高, 渗速快, 适用渗碳层较深场合, 但仅适用于本质细晶粒钢。注意晶粒易粗大和工件畸变大 3) 对渗层要求浅的工作, 应采用温度下限																																																																																																						
渗碳时间 t(h) (t 工件加热至 渗碳温度后开始 计算的保温时间) 及渗碳层深度 δ(mm)	1) 与渗碳温度、炉内气氛(碳势)、材质和工艺方式等多种因素有关 2) 一定条件下, 渗碳层深度 δ 与渗碳时间 t 存在以下关系: $\delta = K\sqrt{t}$ δ 的估算: 对于齿轮, 汽车拖拉机齿轮为 0.2~0.3m; 机床齿轮为 0.15~0.2m; 重型齿轮为 0.25~0.3m; m 为模数。另外, 考虑单边磨削余量的增加: 要求渗碳层 1.0 mm 以上, 一般的单边磨削余量是 0.20 mm。K 值的估算: 它与渗碳温度有关, $K = 660\exp(-8287/T)$ , 在 925℃、900℃ 和 875℃ 时 K 值常取 0.63、0.54 和 0.45, T 为绝对温度, 下表表示获得的相应渗层深度(mm) <table border="1" style="margin: 10px auto;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">渗碳温度(℃)</th> <th colspan="9">渗 碳 时 间 t(h)</th> </tr> <tr> <th>2</th> <th>4</th> <th>8</th> <th>12</th> <th>16</th> <th>20</th> <th>24</th> <th>30</th> <th>36</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td colspan="9" style="text-align: center;">渗 碳 层 深 度 (mm)</td> </tr> <tr> <td>875</td> <td>0.64</td> <td>0.89</td> <td>1.27</td> <td>1.55</td> <td>1.80</td> <td>2.01</td> <td>2.18</td> <td>2.46</td> <td>2.74</td> </tr> <tr> <td>900</td> <td>0.76</td> <td>1.07</td> <td>1.52</td> <td>1.85</td> <td>2.13</td> <td>2.39</td> <td>2.62</td> <td>2.95</td> <td>3.20</td> </tr> <tr> <td>925</td> <td>0.89</td> <td>1.27</td> <td>1.80</td> <td>2.21</td> <td>2.54</td> <td>2.84</td> <td>3.10</td> <td>3.48</td> <td>3.81</td> </tr> </tbody> </table> 3) 钢中合金元素, 首先影响表面碳含量, 其次影响钢中碳的扩散系数。滴注式气体渗碳时, 不同钢种渗碳层深度与渗碳保温时间的关系 <table border="1" style="margin: 10px auto;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">渗碳保 持时间(h)</th> <th rowspan="2">渗碳层深度 (mm)</th> <th>&gt;0.40</th> <th>&gt;0.60</th> <th>&gt;0.80</th> <th>&gt;1.00</th> <th>&gt;1.20</th> <th>&gt;1.40</th> <th>&gt;1.60</th> </tr> <tr> <th>~ 0.60</th> <th>~ 0.80</th> <th>~ 1.00</th> <th>~ 1.20</th> <th>~ 1.40</th> <th>~ 1.60</th> <th>~ 1.80</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>钢 种</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>10, 15, 20</td> <td></td> <td>2~3</td> <td>3~4</td> <td>4~5</td> <td>5~6</td> <td>6~7</td> <td>7~8</td> <td>8~10</td> </tr> <tr> <td>20Cr, 20Mn2B 20CrMnTi</td> <td></td> <td>1.5~2.5</td> <td>2.5~3.5</td> <td>3.5~4.5</td> <td>4.5~5.5</td> <td>5.5~6.5</td> <td>6.5~7.5</td> <td>7.5~9.5</td> </tr> </tbody> </table>	渗碳温度(℃)	渗 碳 时 间 t(h)									2	4	8	12	16	20	24	30	36		渗 碳 层 深 度 (mm)									875	0.64	0.89	1.27	1.55	1.80	2.01	2.18	2.46	2.74	900	0.76	1.07	1.52	1.85	2.13	2.39	2.62	2.95	3.20	925	0.89	1.27	1.80	2.21	2.54	2.84	3.10	3.48	3.81	渗碳保 持时间(h)	渗碳层深度 (mm)	>0.40	>0.60	>0.80	>1.00	>1.20	>1.40	>1.60	~ 0.60	~ 0.80	~ 1.00	~ 1.20	~ 1.40	~ 1.60	~ 1.80	钢 种									10, 15, 20		2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~10	20Cr, 20Mn2B 20CrMnTi		1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~4.5	4.5~5.5	5.5~6.5	6.5~7.5	7.5~9.5
渗碳温度(℃)	渗 碳 时 间 t(h)																																																																																																						
	2	4	8	12	16	20	24	30	36																																																																																														
	渗 碳 层 深 度 (mm)																																																																																																						
875	0.64	0.89	1.27	1.55	1.80	2.01	2.18	2.46	2.74																																																																																														
900	0.76	1.07	1.52	1.85	2.13	2.39	2.62	2.95	3.20																																																																																														
925	0.89	1.27	1.80	2.21	2.54	2.84	3.10	3.48	3.81																																																																																														
渗碳保 持时间(h)	渗碳层深度 (mm)	>0.40	>0.60	>0.80	>1.00	>1.20	>1.40	>1.60																																																																																															
		~ 0.60	~ 0.80	~ 1.00	~ 1.20	~ 1.40	~ 1.60	~ 1.80																																																																																															
钢 种																																																																																																							
10, 15, 20		2~3	3~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~10																																																																																															
20Cr, 20Mn2B 20CrMnTi		1.5~2.5	2.5~3.5	3.5~4.5	4.5~5.5	5.5~6.5	6.5~7.5	7.5~9.5																																																																																															

(续表)

工序及处理参数	具体说明
炉气调节和碳势控制	1) 工件装炉后应迅速排除炉内空气,为建立渗碳气氛创造条件。在深层渗碳(有效硬化层深度>3 mm)中,当炉温升到500℃时,应按炉子容积通入氮气进行保护;在升至800℃时关闭氮气,通入载气直至渗碳温度 2) 滴注式气体渗碳时,炉气碳势取决于液体渗碳剂成分、分解温度和滴入量: ① 使用单一液体,改变滴量调节;② 使用几种渗碳能力不同的液体,改变滴量调节;③ 甲醇(或乙醇+水)作稀释气,固定滴量,另滴入C/O>1的渗剂,改变滴量调节炉气碳势(当C/O比高,碳势增加,但分解温度提高则碳势降低) 3) 滴注式气体渗碳多采用红外线碳势自动控制系统;吸热式和氨基气氛渗碳时常采用连续自动调节碳势测量的传感器,有露点仪、红外线气体分析仪、氧探头和电阻法碳势测量仪等,控制方法和特点如下:① 露点仪:测量炉气气样中水汽的露点,简易,偏差不大,不能连续自动调节,多用于开炉前测定,精度约±1℃;② LiCl露点仪:测量气样中的露点,反应较慢,控制滞后大,精度为±1.5℃,不能用于含氨气氛;③ 氧探头(ZrO <sub>2</sub> ):测量的是炉气的氧势,灵敏,无需取样系统,寿命较低,精度对碳可达±0.03%;④ 红外线气体分析:测量CO <sub>2</sub> 、CO、CH <sub>4</sub> ,可进行多点测量和控制,灵敏,精度(对CO <sub>2</sub> )为±0.03%;⑤ 热丝电阻法:可立即读出碳势,精度为±0.05%,但钢丝易坏,易受污染;⑥ 微机控制技术:可控表面含碳量和碳浓度分布 4) 钢箔测定碳势法:原始 $\alpha_c \leq 0.1\%$ 、厚≤0.05 mm、100 mm×100 mm钢箔放入渗碳气氛中,停留足够时间(如15 min)使其均匀渗透,快冷取出擦净,用称重法定出含碳量,即为炉气碳势
渗后冷却	渗后冷却方式:(1) 出炉空冷;(2) 移至缓冷坑冷(保护);(3) 随炉冷至550℃后出炉空冷。后续工序:清洗、变形检查、喷砂(渗后热处理、质量检验见后)

### 3. 常用的气体渗碳工艺

1) 滴注式气体渗碳工艺 目前仍是国内企业中广泛应用的方法。

(1) 大滴量渗碳工艺:工艺曲线如图3-15所示,为60 kW井式渗碳炉应用两种渗碳剂的情况(滴/min)。

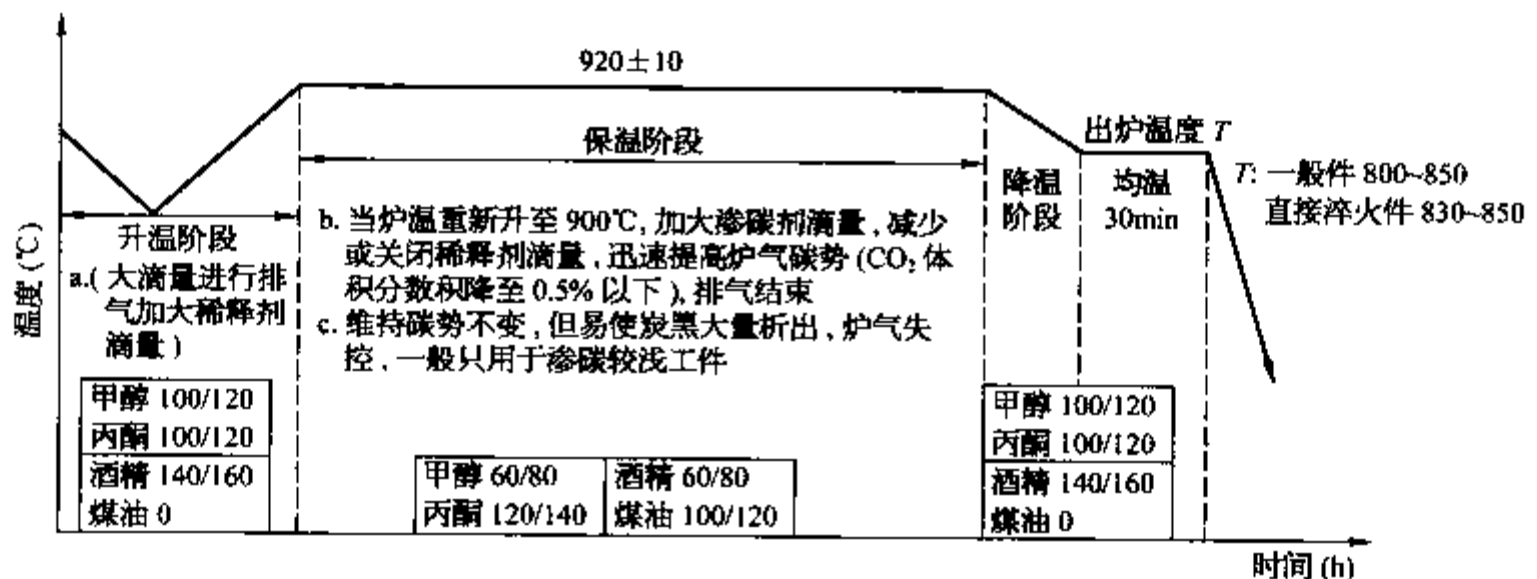
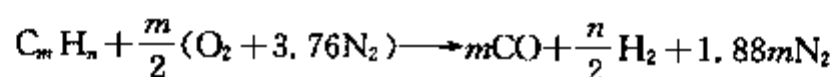


图3-15 大滴量渗碳工艺曲线(60 kW井式渗碳炉)

(2) 小滴量渗碳工艺:工艺曲线如图3-16所示,为90 kW井式气体渗碳炉,20CrMnTi工件,渗碳层深度1~1.5 mm的情况。

(3) 井式炉滴注式可控气体渗碳工艺:工艺曲线如图3-17所示,为60 kW井式炉,20CrMnTi工件,渗碳层深度1.2~1.8 mm的情况。注意:CH<sub>4</sub>含量>1.5%~2%,以防止析出大量炭黑,造成炉气失控,这是重要前提条件。

2) 吸热式气体渗碳工艺 密封箱式炉和连续式炉常采用吸热式气氛进行气体渗碳。吸热式气氛制备及富化气(如CH<sub>4</sub>)的反应如下:



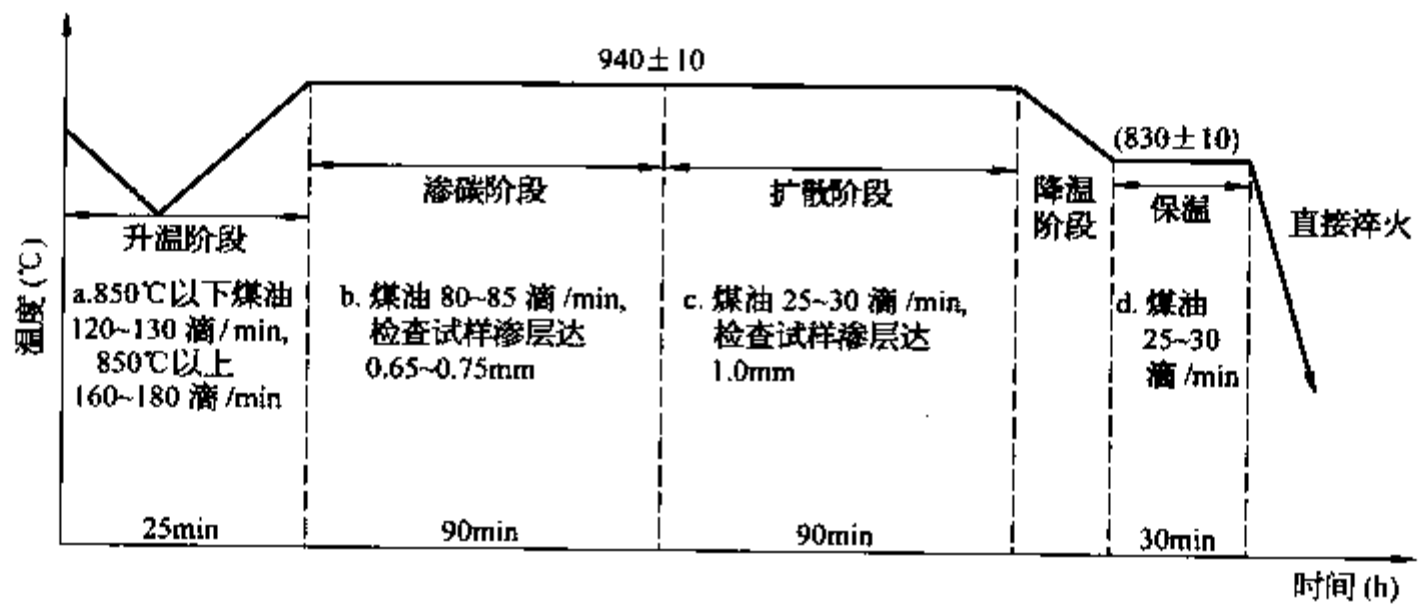


图 3-16 小剂量渗碳工艺曲线(90 kW 井式渗碳炉)

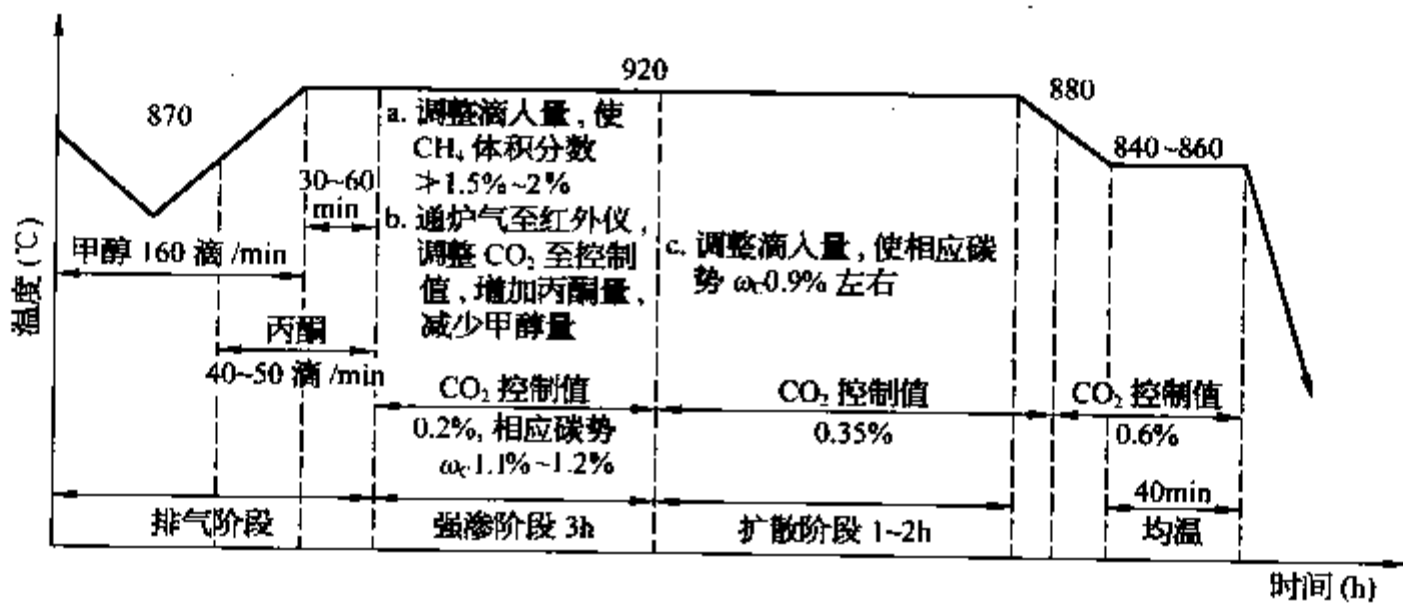
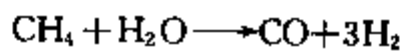


图 3-17 滴注式可控气体渗碳工艺曲线(60 kW 井式渗碳炉)



吸热式气氛主要组成为  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  和  $\text{N}_2$ ，及微量  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{O}_2$  等，富化气的加入使  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  减少， $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  含量增加，能产生明显的渗碳效果。但反应过程进行缓慢，难以达到平衡。加之实际生产过程高的气氛供给速率、 $\text{CH}_4$  分解缓慢、 $\text{H}_2$  增加不明显，所以气氛中  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2$  含量基本处于稳定。这样只需测定单一  $\text{CO}_2$  或  $\text{O}_2$  含量便可确定炉气碳势。

但不同原料气制成的吸热式气氛中， $\text{CO}$  含量有很大差别，这样，碳势与  $\text{CO}_2$  含量、露点或氧探头输出电势之间的关系随  $\text{CH}_4$  或  $\text{C}_3\text{H}_8$  而变。图 3-18~图 3-20 所示为由  $\text{CH}_4$  制成的吸热式气氛的这种关系。

3) 氮基气氛渗碳工艺 以纯氮(40%，体积分数)+甲醇裂解气(60%，体积分数)并以  $\text{CH}_4$  或  $\text{C}_3\text{H}_8$  为富化气可成功取代吸热式气氛，用于连续作业气体渗碳，省去了发生装置，却具有吸热式气氛的渗速、重现性等优点。另外还可采用丙酮或醋酸乙酯的裂解气作为渗碳气氛。

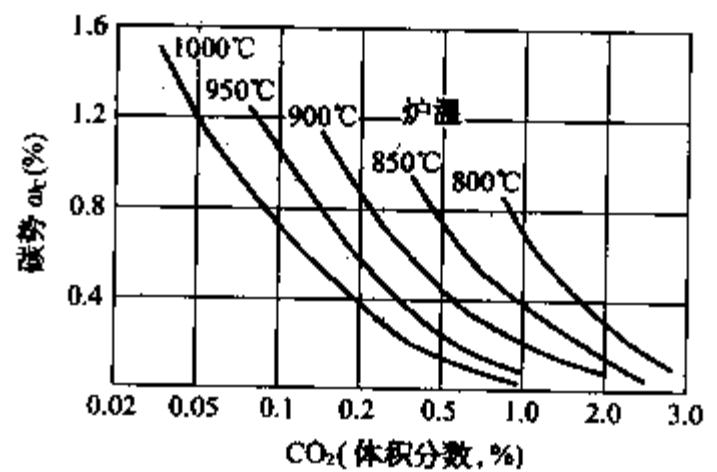


图 3-18 由  $\text{CH}_4$  制成的吸热式气氛中碳势与  $\text{CO}_2$  含量之间的关系



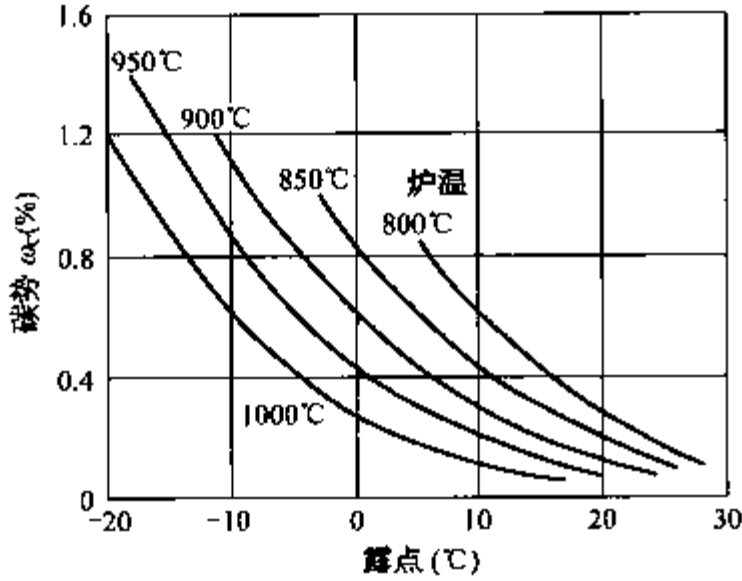


图 3-19 由 CH<sub>4</sub> 制成的吸热式气氛中碳势与露点之间的关系

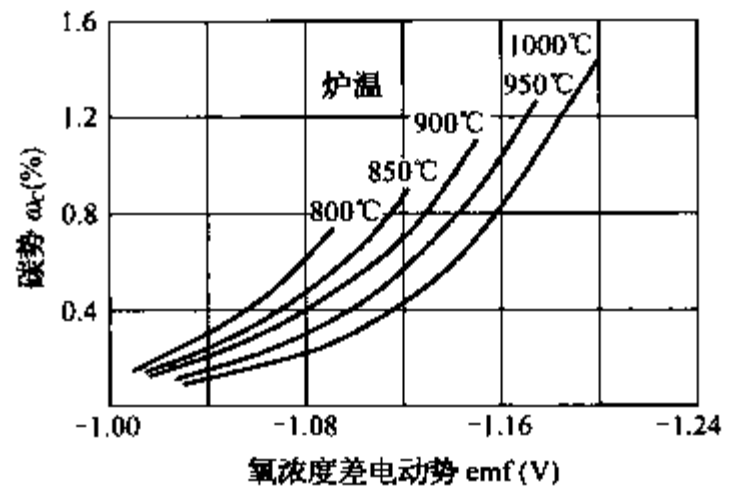
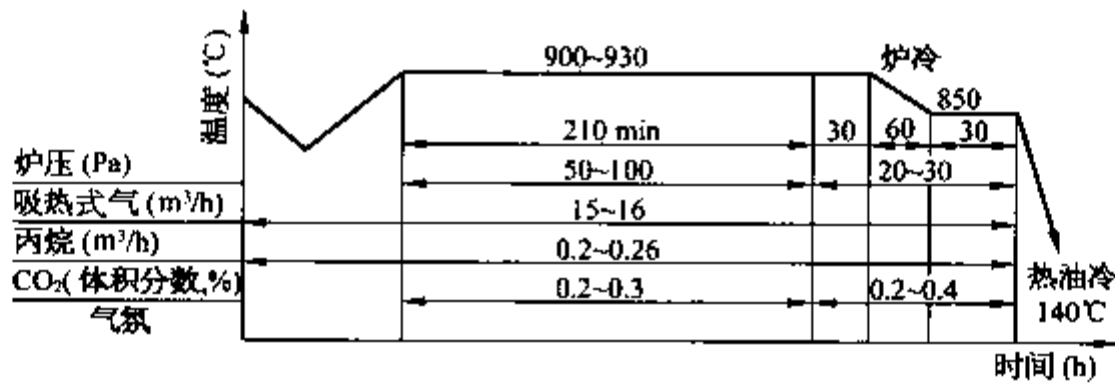


图 3-20 由 CH<sub>4</sub> 制成的吸热式气氛中碳势与氧探头输出电势的关系

密封箱式炉的气体渗碳工艺操作见表 3-34, 工艺曲线见图 3-21 所示。进行连续式炉的气体渗碳时, 将贯通式炉膛分为加热区、渗碳区、扩散区和预冷淬火区, 其工艺过程见图 3-22。

表 3-34 密封箱式炉气体渗碳工艺操作

步骤	工 艺 操 作
准备阶段	1) 零件清理、检验、装夹和检查设备运行记录、交班记录 2) 检查炉内电阻板、辐射管是否开裂变形、是否水平, 炉内抗渗碳砖的完好情况及砖缝漏气情况 3) 淬火升降机构升降平稳、制动可靠, 工件进出炉轨道畅通 4) 淬火油槽的油加热系统、循环系统、冷却系统正常。油量充足, 油中不得有水和炭黑, 油循环定向导流板应将油流向料筐 5) 吸热式气氛碳势(组分体积分数)应在 0.8% 以上(露点 0~-5℃), 氮基气氛中氮气(体积分数)大于 98%, 净化后氮基气氛中氮气(体积分数)大于 99.99%
进炉	1) 当一切准备工作检查合格后, 方可使工作炉升温, 当工作炉温度大于 760℃ 以上时, 方可通吸热式气氛, 使炉气正压, 并随即进行点燃火幕和前室排净操作 2) 待炉温加热至 930℃, 所有火帘都点燃后, 工件才可入炉 3) 淬火升降机构, 既是进出料筐通道, 也是淬火、预冷、沥油的夹具, 故升降机构的位置应和工艺要求相同, 一般是下面平台上第一料筐淬火入油冷却, 上面平台上的料筐和工件推入炉膛加热渗碳, 关闭内炉门, 第二筐推入上面平台入前室, 进行排净去污预热, 下平台上料筐出油沥尽出炉后, 内炉门打开, 第二筐又出炉淬火, 第三筐入炉渗碳, 这样循环往复 4) 如工件不淬火, 出炉空冷, 则料筐应放在上平台上预冷, 待下平台料筐装炉后, 再让上平台料筐下降出炉 5) 炉门必须有火帘密封, 内炉门密封火帘应保证炉膛保持正压和油气不得进入炉内
渗碳及淬火	1) 周期炉炉压应控制在 50~100 Pa 左右 2) 工业氮气与甲醇裂解产物的比例以氮气 40%+甲醇裂解气 60%(体积分数)最佳 3) 通入丙烷富化气量约为载气量(体积分数)的 4% 左右, 通入 CH <sub>4</sub> 、C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> 或其他有机液应进行碳当量换算, 并根据炉气碳势具体来调节, 以富化气量不产生炭黑为宜 4) 换气次数以 4~6 次为好 5) 渗碳温度、渗层深度、扩散时间等具体见工艺曲线 6) 也可将有机液体直接滴入炉中产生裂解, 其反应式为 甲醇: CH <sub>3</sub> OH → CO+2H <sub>2</sub> 乙醇: C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH → CO+3H <sub>2</sub> + [C] 丙酮: CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> → CO+3H <sub>2</sub> + [C]              乙酸乙酯: CH <sub>3</sub> COOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> → 2CO+4H <sub>2</sub> +2[C] 7) 淬火油的温度应控制在 100~140℃, 工件冷到与油温相同时出油较好
注意事项	1) 送排气时, 不得在炉门正面操作, 以防喷火孔突然爆炸喷火伤人 2) 应经常用火把检验炉体各部位的泄露情况 3) 原料气罐、气瓶周围严禁明火, 应有防火、防爆、防触电等装置或灭火器材 4) 管路应该用浓肥皂水试漏, 严禁用火把查气; 丙烷气在压力小于 200 kPa 时使用, 丁烷气压力在 5 kPa 时禁用



20CrMnTi 汽车齿轮渗层 0.8~1.2 mm, 红外线控制碳势

图 3-21 密封箱式炉气体渗碳工艺曲线(炉膛尺寸 900 mm×700 mm×500 mm)

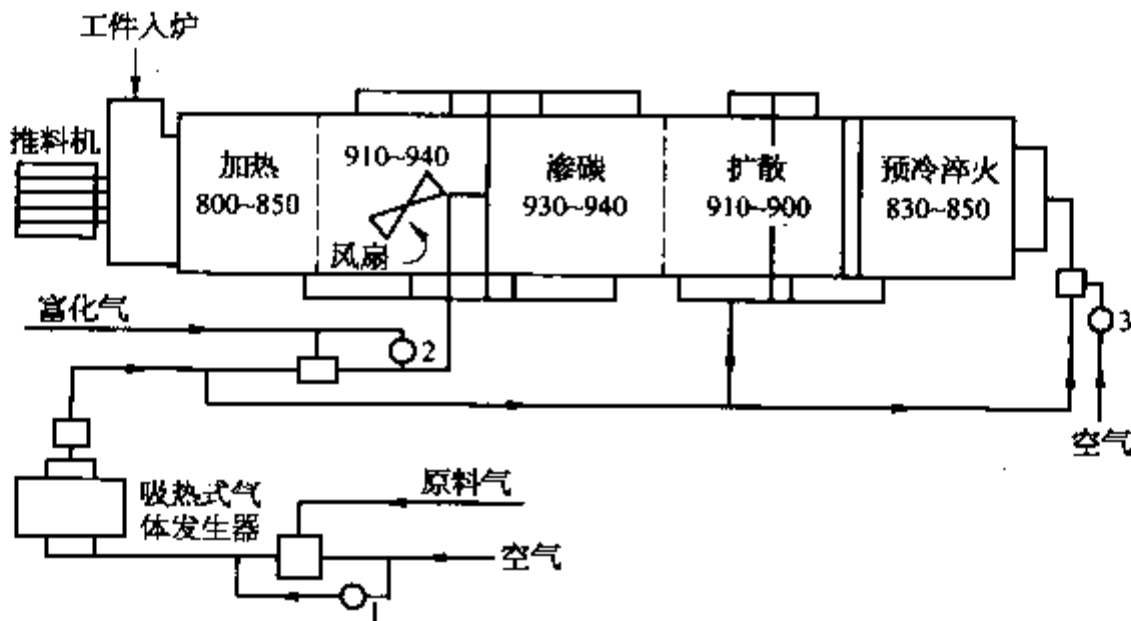


图 3-22 连续式炉气体渗碳工艺过程

1—吸热式气体露点调节仪; 2—渗碳区炉气露点调节阀; 3—预冷区炉气露点调节阀

#### 四、渗碳后的热处理

工件渗碳后需进行合理的热处理(表 3-35), 来获得高的力学性能和应用性能。相应的渗碳层显微组织为细粒状弥散均匀分布碳化物+隐针状马氏体, 心部显微组织不出现块状铁素体。

表 3-35 渗碳后的热处理方式

热处理方式	淬火回火方式	适用情况
渗碳后随炉冷或出炉预冷直接淬火方式	冷至 760~850°C 直接淬火 + 160~200°C 低温回火 2~3 h	20CrMnTi, 20MnVB, 25MnTiBRE 等本质细晶粒钢
	预冷后在 120~160°C 热油中分级停留一段时间, 空冷 + 180~200°C 低温回火 2~3 h	形状复杂、厚薄相差大的小零件
	直接淬火后进行 -60~-80°C, 1~2 h 冷处理 + 180~200°C 低温回火 2~3 h	20Cr2Ni4, 20CrNiMo, 12SiMn2WV 等大截面重负荷零件
	直接淬火后在 >500°C 温度多次回火, 使残留奥氏体中析出特殊细小碳化物发生二次硬化, 使在 350~370°C 工作时硬度达 58 HRC	高速大负荷高温下工作的零件(如 >350°C 高速齿轮), 如 15Cr3NiWMo2V 1030°C 渗碳在 530°C 回火 3 次
	冷至 780~810°C 直接淬火 + 160~200°C 低温回火 2~3 h + -60~-80°C 冷处理 1~2 h + 160~180°C 低温回火 2~3 h	大截面、重负荷高合金渗碳件, 如 18Cr2Ni4W, 20CrNiMoA 等

(续表)

热处理方式	淬火回火方式	适用情况
渗碳后空冷或缓冷坑中冷至300℃空冷+重新一次淬火+低温回火方式	重新加热至770~830℃后淬火+160~200℃低温回火2~3h	不宜直接淬火的零件或渗碳后需机加工的零件
	空冷后+640~660℃2~3h回火2~3次(空冷)+780~820℃加热淬火+180~200℃回火2~3h	12CrNi3、20CrNiMo、18Cr2Ni4WA等渗碳层中残留奥氏体减少,析出合金碳化物的大截面高负荷工件
	空冷后650℃高温回火+790℃加热淬火+-120℃冷处理+160℃低温回火+120℃时效	要求极精密的高合金钢,如18Cr2Ni4WA、20Cr2Ni4,如高速柴油机喷油嘴壳体
	渗碳后感应加热淬火+低温回火	表面受高接触应力、磨损及抗弯、抗扭,但对心部要求不高的工件
	渗碳后空冷+一次淬火加热后在心部Ms点以下和渗层Ms点以上等温分级淬火+低温回火	18Cr2Ni4WA等马氏体分级淬火
渗碳后空冷+二次淬火+低温回火方式	第一次加热至心部Ac <sub>3</sub> 以上,碳钢880~920℃、合金钢860~900℃淬火细化心部组织;第二次加热至渗层Ac <sub>1</sub> 以上760~780℃淬火+160~200℃低温回火1.5~2h	10、20、15Cr、20Cr钢,表面高硬度心部有高冲击韧度的零件;高强度高合金渗碳钢12CrNi3、12Cr2Ni4、20CrNi4、18Cr2Ni4WA等
	渗碳后+850~870℃淬火+640~670℃高温回火+780~830℃二次淬火+160~180℃低温回火1.5~2h	大截面、高负荷高合金渗碳钢,如18Cr2Ni4WA、20CrNiMo等
	渗碳后直接淬火+350~450℃回火+快速加热至较低淬火温度淬油+170~230℃低温回火	需提高耐磨性、韧性和接触疲劳强度的工件

## 五、渗碳件的质量检验

渗碳件的质量检验的项目和具体说明见表3-36。

表3-36 渗碳前后的质量检验

项 目	具 体 说 明		
工件渗碳前的检验	1) 工件表面不存在锈迹、油污、氧化和损伤 2) 钢件应符合相应钢种技术条件 3) 渗碳齿轮材料奥氏体晶粒度应为5级以上,不应有混晶;带状组织一般不大于3级,非金属夹杂物的氧化物、硫化物各不大于3级 4) 对可靠性要求高的齿轮,采用以真空冶炼、电渣重熔或真空重熔等方法制造材料,含氧量小于 $2 \times 10^{-3}\%$ 、含氮量小于 $5 \times 10^{-4}\%$ 、 $w_s < 0.015\%$ 5) 第3、4项要求也可参照GB/T8539中表6		
渗碳后表面硬度测定	1) 选择工件或试样的代表性部位,对模数 $\geq 12$ mm的齿轮在齿宽中线齿根区域抽查或全部检查,满足图样要求 2) 硬度测试标尺选用HRC、HR30N、HR45N,对应淬硬层深度CHD(GB/T9450—2005,以前标准称有效硬化层深)为 $>0.3 \sim 0.5$ mm、 $>0.5 \sim 0.8$ mm和 $>0.8$ mm的相应硬度范围为78~80 HR30N、63~69 HR45N和58~62 HRC(按JB/T7516—1994) 3) 齿轮按工件代表性表面硬度,根据一般要求齿轮(ML)、有经验制造者在一般成本下可达的等级(MQ)和高可靠制造过程控制等级(ME)的测定值列下表中:		
	ML	MQ	ME
	$\geq 55$ HRC 或 73HR30N	58~64 HRC 75.7~81.1 HR30N	58~64 HRC 75.7~81.1 HR30N
	抽 查	抽 查	同炉 $\leq 5$ 件全检, $>5$ 件抽查

(续表)

项 目	具 体 说 明																																					
渗碳后表面 硬度测定	4) 测定值允差: 对单件——重要件和一般件分别为 3 HRC 和 4 HRC(深层渗碳也同), 对同批——重要件和一般件分别为 5 HRC 和 7 HRC 5) 试样测定部位: 在试样截面上距表面 0.05~0.10 mm 处; 对要磨齿的齿轮, 测定部位应从试样表面至轮齿单侧加工余量的深度部位 6) 齿轮测定部位以齿面为准, 也可测齿顶或端面, 要求分布在相隔 120° 的三个轮齿上, 测定不少于 2 点, 结果符合图样要求																																					
心部硬度及 心部组织(按各 行业规定或生 产厂用户协议)	1) 心部硬度与钢淬透性、轮齿截面尺寸有关, 不同标准要求的测定部位不同, 测值也不同, 应具体标明 2) JB/T7516—1994 规定一般要求 30~45 HRC, 测定部位为轮齿中心线距齿顶 2/3 处 3) GB/T8539—2000 推荐的测定位置为齿宽中部的齿根 30°切线法向线上 5 倍硬化层深度处, 但不小于 1 倍模数处, 测定值按 ML、MQ 和 ME 分别为 21 HRC、25 HRC 和 35 HRC 以上(注意: ME 齿轮心部组织中不允许有块状游离铁素体) 4) JB/T7516—1994 规定: 下述圆棒尺寸的试样, 在棒中部截取 10 mm 厚试样, 在横截面中心处测定, 试样尺寸由模数 $m$ 决定: <table border="1" data-bbox="460 1048 1793 1208"> <thead> <tr> <th><math>m</math>(mm)</th> <th>≤6</th> <th>&gt;6~10</th> <th>&gt;10~18</th> <th>&gt;18</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>尺寸(mm)</td> <td>φ32×76</td> <td>φ56×130</td> <td>φ76×180</td> <td>φ90×205</td> </tr> </tbody> </table> 5) 齿轮检验中一般以随炉试样为准, 工厂可确定解剖实际齿轮及周期	$m$ (mm)	≤6	>6~10	>10~18	>18	尺寸(mm)	φ32×76	φ56×130	φ76×180	φ90×205																											
$m$ (mm)	≤6	>6~10	>10~18	>18																																		
尺寸(mm)	φ32×76	φ56×130	φ76×180	φ90×205																																		
淬硬层深 度 CHD ( GB/T9450— 2005) [有效硬化层 深度 $D_c$ (JB/ T7516—94 JB/T3999—99 JB/T8929—99 JB/T8539— 2000)]	1) 测定方法按 GB/T9450—2005, 它定义为钢制零件渗碳或碳氮共渗淬火, 回火后从表面到维氏硬度为 550 HV1(载荷 9.8 N)或与之相应的努尔硬度处的垂直距离, 用 CHD(mm)表示(550 HV1 为界限硬度, 适用于距表面三倍于 CHD 处硬度值小于 450 HV1 的零件, 其他情况参照标准确定) 2) 试样, 原则上采用零件本身; 特殊情况下, 可协商采用与零件材质相同、加工和热处理工艺规范一致, 形状和尺寸差不多或相近的试样 3) 对渗碳淬火后需加工齿轮, 渗碳工艺层深应为图样上标注深度加上轮齿单侧加工余量 4) 深层渗碳中 CHD 值不均匀允差应小于 10% 5) CHD 允许偏差按下表确定(mm): <table border="1" data-bbox="460 1645 1793 1863"> <thead> <tr> <th>CHD</th> <th>&lt;0.50</th> <th>0.50~1.50</th> <th>&gt;1.50~2.50</th> <th>&gt;2.50</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>单件</td> <td>0.10</td> <td>0.20</td> <td>0.30</td> <td>0.50</td> </tr> <tr> <td>同批</td> <td>0.20</td> <td>0.30</td> <td>0.40</td> <td>0.60</td> </tr> </tbody> </table> 6) 渗碳齿轮 CHD 推荐值示于下表(详见 JB/T7516—1994 附录 A): <table border="1" data-bbox="460 1936 1793 2169"> <thead> <tr> <th>模数 (mm)</th> <th>1.5</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> <th>10</th> <th>14</th> <th>18</th> <th>22</th> <th>32</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CHD (mm)</td> <td>0.25~ 0.50</td> <td>0.40~ 0.65</td> <td>0.65~ 1.00</td> <td>0.75~ 1.30</td> <td>1.00~ 1.50</td> <td>2.00~ 2.60</td> <td>2.60~ 3.50</td> <td>3.00~ 3.90</td> <td>3.70~ 4.80</td> <td>4.00~ 5.00</td> </tr> </tbody> </table> 7) GB/T8539—2000 规定用代表性试样或类似齿轮的同模数齿块试样的齿宽中部位于齿顶圆以下的齿顶高上检查(注意: 指标与齿面接触强度有关, 规定 CHD 的最小值时应注意到对于弯曲强度和表面承载能力的最佳值不一样; 确定 CHD 最大值时应考虑齿顶脆性的增加, 为此应正确确定) 8) 齿轮有效硬化层在采用渗碳控制技术稳定生产时, 可以以随炉试样结果为准, 实际抽验可具体确定; 当无控制情况下, 在试样合格时, 每周应抽一件齿轮解剖测定	CHD	<0.50	0.50~1.50	>1.50~2.50	>2.50	单件	0.10	0.20	0.30	0.50	同批	0.20	0.30	0.40	0.60	模数 (mm)	1.5	2	3	4	5	10	14	18	22	32	CHD (mm)	0.25~ 0.50	0.40~ 0.65	0.65~ 1.00	0.75~ 1.30	1.00~ 1.50	2.00~ 2.60	2.60~ 3.50	3.00~ 3.90	3.70~ 4.80	4.00~ 5.00
CHD	<0.50	0.50~1.50	>1.50~2.50	>2.50																																		
单件	0.10	0.20	0.30	0.50																																		
同批	0.20	0.30	0.40	0.60																																		
模数 (mm)	1.5	2	3	4	5	10	14	18	22	32																												
CHD (mm)	0.25~ 0.50	0.40~ 0.65	0.65~ 1.00	0.75~ 1.30	1.00~ 1.50	2.00~ 2.60	2.60~ 3.50	3.00~ 3.90	3.70~ 4.80	4.00~ 5.00																												
至表面硬度 降(在 CHD 内 次层最高硬度与 表层硬度之差)	1) 按各行业标准执行 2) 齿轮渗碳按 GB/T8539 执行; 对 ML 齿轮不予规定; 对 MQ 齿轮以齿轮工件或代表性试样测定, 硬度降低不超过 2 HRC, 当精加工状态硬度在 650 HV 以上时, 硬度降低限制在 40 HV 以下; 对 ME 齿轮的硬度降低不大于 30 HV																																					

(续表)

项 目	具 体 说 明																		
显微组织检查	以下齿轮显微组织检查按代表性试样进行。一般设过程控制试样和代表性试样,前者用于检测渗碳工艺稳定性,后者反映产品的组织及性能。一般此部分对 ML 齿轮不要求,对 MQ 和 ME 齿轮叙述如下:																		
1) 表面 $\omega_C$	1) 对 MQ 和 ME 齿轮都规定为:共析 $\omega_C+0.20\%$ 或 $-0.10\%$ ,建议代表性试样中的显微组织以细针马氏体为主,贝氏体含量小于 $10\%$ 2) QC/T262—1999 规定推荐 $\omega_C$ 为 $0.8\% \sim 1.0\%$																		
2) 表面 $\omega_N$ (碳氮共渗时)	按技术条件确定,一般不超过 $0.3\%$																		
3) 残余奥氏体 (马氏体)	1) 残留奥氏体量控制(GB/T8539—2000): <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width:50%;">MQ</th> <th style="width:50%;">ME</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align:center;">25%以下</td> <td style="text-align:center;">25%以下,且细小弥散</td> </tr> </tbody> </table> 2) 一般齿轮应控制在 $30\%$ 以下,高精度齿轮应控制在 $20\%$ 以下,对留加工余量的齿轮,评定部位按内控标准(JB/T7516—1994) 3) 汽车齿轮按 QC/T262—1999 执行,残留奥氏体含量和马氏体大小等级共分 8 级,一般 1~5 级合格	MQ	ME	25%以下	25%以下,且细小弥散														
MQ	ME																		
25%以下	25%以下,且细小弥散																		
4) 碳化物	1) 碳化物控制(GB/T8539—2000): <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width:33%;">ML</th> <th style="width:33%;">MQ</th> <th style="width:33%;">ME</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align:center;">允许有半连续状碳化物网</td> <td style="text-align:center;">允许有断续的碳化物(代表性试样,所有碳化物长度不大于<math>0.02\text{ mm}</math>)</td> <td style="text-align:center;">允许弥散状碳化物(代表性试样)</td> </tr> </tbody> </table> 2) 按各行业金相检验级别图评定(JB/T7516—1994) 3) 汽车齿轮按 QC/T262—1999 执行,放大 400 倍下检查,检查部位为齿顶角及工作面,常啮合齿轮 1~5 级合格,换挡齿轮 1~4 级合格。如在 400 倍下,无明显碳化物,但试样表面硬度及含碳量合格,表层组织不为亚共析状态时,可评为 1 级	ML	MQ	ME	允许有半连续状碳化物网	允许有断续的碳化物(代表性试样,所有碳化物长度不大于 $0.02\text{ mm}$ )	允许弥散状碳化物(代表性试样)												
ML	MQ	ME																	
允许有半连续状碳化物网	允许有断续的碳化物(代表性试样,所有碳化物长度不大于 $0.02\text{ mm}$ )	允许弥散状碳化物(代表性试样)																	
5) 表面非马氏体 IGO(深度) ( $4\% \text{ HNO}_3$ - $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 400 倍下检测)	1) 检测部位为分度圆及齿根角处(JB/T7516—1994) 2) IGO 具体要求见下表(GB/T8539—2000): <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width:33%;">渗层深度(mm)</th> <th style="width:33%;">MQ IGO(<math>\mu\text{m}</math>)</th> <th style="width:33%;">ME IGO(<math>\mu\text{m}</math>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align:center;"><math>&lt;0.75</math></td> <td style="text-align:center;">17</td> <td style="text-align:center;">12</td> </tr> <tr> <td style="text-align:center;"><math>0.75 \sim &lt;1.50</math></td> <td style="text-align:center;">25</td> <td style="text-align:center;">20</td> </tr> <tr> <td style="text-align:center;"><math>1.50 \sim &lt;2.25</math></td> <td style="text-align:center;">38</td> <td style="text-align:center;">20</td> </tr> <tr> <td style="text-align:center;"><math>2.25 \sim &lt;3.00</math></td> <td style="text-align:center;">50</td> <td style="text-align:center;">25</td> </tr> <tr> <td style="text-align:center;"><math>\geq 3.00</math></td> <td style="text-align:center;">60</td> <td style="text-align:center;">30</td> </tr> </tbody> </table> 若超差,可协调采用控制喷丸补救 3) 汽车齿轮按 QC/T262—1999 执行,非马氏体 IGO 深度不大于 $0.02\text{ mm}$	渗层深度(mm)	MQ IGO( $\mu\text{m}$ )	ME IGO( $\mu\text{m}$ )	$<0.75$	17	12	$0.75 \sim <1.50$	25	20	$1.50 \sim <2.25$	38	20	$2.25 \sim <3.00$	50	25	$\geq 3.00$	60	30
渗层深度(mm)	MQ IGO( $\mu\text{m}$ )	ME IGO( $\mu\text{m}$ )																	
$<0.75$	17	12																	
$0.75 \sim <1.50$	25	20																	
$1.50 \sim <2.25$	38	20																	
$2.25 \sim <3.00$	50	25																	
$\geq 3.00$	60	30																	
6) 表面脱碳 ( $4\% \text{ HNO}_3$ - $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,400 倍下检测,着重检查齿根圆角处)	齿轮脱碳层深度不大于 $0.02\text{ mm}$ 或按 GB/T8539—2000 分档																		

(续表)

项 目	具 体 说 明
心部冲击韧度	JB/T7516—1994 规定,用户要求时,在随炉圆试样或齿坯试样上取料加工成冲击试样进行试验
齿轮外观、裂纹和畸变检查	1) 表面不得有氧化皮、碰伤、剥落和锈蚀 2) 畸变,按技术要求规定 3) 裂纹,对可靠性要求高的应 100%探伤;齿部磁粉探伤的缺陷最大尺寸与模数相关,按 GB/T8539—2000 分级 4) 冷处理后微裂纹,在 400 倍下观察随炉试样,在 0.30 mm×0.25 mm 矩形中,长度大于 1 个晶粒的微裂纹不得超过 10 个

## 六、渗碳件的常见缺陷、产生原因及防止措施

渗碳件的常见缺陷、产生原因、防止措施及返修见表 3-37。

表 3-37 渗碳件的常见缺陷、产生原因、防止措施及返修

缺陷形式	产生原因	防止措施及返修
I: 渗碳层出现大块状或网状碳化物,渗层表面易剥落	因渗碳件表面碳浓度偏高产生。工艺上的原因: 1) 滴注式渗碳: 渗剂滴量过大 2) 控制气氛渗碳: 富化气比例过大 3) 液体渗碳: 盐浴 $CN^-$ 含量过高 4) 固体渗碳: 渗剂活性偏高 5) 渗碳后冷速较慢	防止措施: 减少渗剂滴量; 减低富化气比例; 降低 $CN^-$ 含量; 减少催渗剂量, 合理确定粒度及催渗剂级别; 渗后空冷可吹风助冷 返修: 在较低碳势气氛下保温(如 0.8% 碳势 2~4 h), 降低表面碳浓度后按渗后热处理方法处理; 采用正火+淬火或正火+高温回火+淬火回火或两次淬火方式作渗后热处理; 在质量分数 3%~5% 苏打和木炭中在 920~940℃ 保温 2~4 h, 以降低表面含碳量
II: 渗碳层出现大量残留奥氏体, 表面硬度低	渗碳层奥氏体中碳及合金元素高, 其 $M_s$ 点较低造成。工艺上的原因: 1) 回火不及时, 奥氏体热稳定化 2) 回火后冷却太慢	防止措施: 回火及时; 回火后油冷; 渗碳件表面含碳量按图纸技术要求, 合理确定扩散时炉气碳势 返修: 对高合金渗碳钢按渗后热处理方法重新处理; 进行冷处理; 合理确定返修工艺参数, 可适当降低淬火加热温度, 但应注意心部组织及性能要求
III: 渗碳层出现黑色组织(屈氏体组织)	渗碳介质中含氧量较高, 氧向钢中扩散, 在晶界上形成 Cr、Mn、Si 的氧化物, 使合金元素贫化, 形成淬透性偏低, 淬火后出现黑色网状组织	防止措施: 控制炉气成分, 降低含氧量, 但这弊病较难避免; 适当增加淬火冷速; 采用真空渗碳可完全避免 返修: 提高淬火温度和延长保温时间使奥氏体均匀化, 并增加淬火冷速; 喷丸处理可适度补救性能上的相差
IV: 心部铁素体过多, 使其硬度偏低	渗后热处理规范不正确造成。工艺上原因: 1) 淬火温度低, 保温时间短 2) 淬火冷速不够 3) 预备热处理不正确	防止措施: 正确制定预备热处理; 正确确定渗后热处理规范 返修: 按正确渗后热处理规范重新处理
V: 出现反常组织(出现游离 F, 在二次渗碳体周围出现游离 F 或网状 F)	1) 钢中(沸腾钢)和渗碳介质中含氧量过高造成, 使淬火时出现软点, 降低了耐磨性 2) 渗碳剂中含有水分	防止措施: 沸腾钢不适合应用; 渗碳剂应当除水分(烘干或干燥方法) 返修: 提高奥氏体化加热温度和延长保温时间, 使奥氏体均匀化后快冷淬火

(续表)

缺陷形式	产生原因	防止措施及返修
渗碳工艺操作缺陷	I: 表面脱碳	防止措施: 调整好碳势和注意冷却坑中的保护,盐炉应正确脱氧 返修: 在调整好碳势的气氛中补渗;喷丸处理可适度补救性能上的相差
	II: 渗层碳含量偏低	防止措施: 调整好碳势,使炉气均匀,注意炉压; 合理装炉保持工件间隙;防止漏气; 经常烧炭黑或清理积炭 返修: 在调整好碳势的气氛中补渗
	III: 渗碳层深度不足	防止措施: 密切注意调整工艺参数;防止炉子漏气;控制装炉量;工件清理干净 返修: 在要求的碳势下补渗,合理确定补渗时间,注意试样深度和操作经验
	IV: 渗层深度不均匀	防止措施: 加强渗前准备工作;清除炉内积炭;合理装料,工件不能接触 返修: 不均匀严重的难以返修或降级使用
报废缺陷	I: 渗碳层过厚	采取措施,严格操作 深度超过图纸上限要求,不合格则报废
	II: 畸变量超差	畸变量超差,不能校正则报废
	III: 渗碳件开裂	防止措施: 合理设计冷却过程,减小热应力、组织应力 返修: 开裂渗碳件报废
	IV: 表面腐蚀和氧化	防止措施: 应控制渗剂与盐浴成分,及时清理清洗 返修: 工件表面腐蚀、氧化深度大于放磨余量则报废
	V: 渗碳件过热	防止措施: 控温系统应设置超温警报,严格作业制度,采用正火处理,使晶粒细化 返修: 过热严重,晶粒不能细化的则报废处理

### 第三节 钢的渗氮

气体渗氮在生产上应用最早,广泛应用于精密机械零件以及工模具制造等领域。但是,由于传统的气体渗氮工艺容易产生疏松多孔的化合物层,渗层脆性大,渗氮层的深度较浅,基体的强度低于渗碳,因而极大地限制了这种工艺的发展和应用。

20世纪80年代以来,随着计算机技术在热处理方面的应用,生产中实现了氮势的自动控制,使形状复杂和渗层深度要求较深的零件的渗氮效果得到了很大提高。同时出现了短时渗氮、低压脉冲渗氮和奥氏体渗氮等新工艺。

气体渗氮和离子渗氮工艺的定义和特点见表3-38。

表3-38 气体渗氮和离子渗氮工艺的定义和特点

渗氮工艺	定 义	主 要 特 点
气体渗氮	向密封的炉罐中通入含氮气体,并加热到一定温度,使氮原子渗入到工件表层的化学热处理工艺	处理温度低、适用钢种多、强化效果显著,工件的畸变小、耐磨、耐腐蚀、抗疲劳,对于热作模具还能提高其抗粘着、抗咬合性能,并能抵抗铝液对模具的熔损作用
离子渗氮	在低于 $10^5$ Pa (通常是 $10^{-1}$ Pa ~ $10^{-3}$ Pa) 的渗氮气氛中,利用工件(阴极)和阳极之间产生的辉光放电进行渗氮的工艺	1) 处理温度范围较宽,即使在 $350^\circ\text{C}$ ,也能获得一定厚度的渗氮层 2) 离子渗氮速度比气体渗氮快 3) 化合物层结构易于控制 4) 可节省气源及氮气消耗 5) 非渗氮部位便于保护 6) 自动去除钝化膜 7) 无公害,排出的废气极少,基本上无有害物质产生

#### 一、基本概念

##### 1. 氮势

氮势是表征渗氮气氛在一定温度下渗氮能力的热力学的度量,是炉气中的氮分压与氢分压的1.5次方的比值。在工程技术中,含氮气体的氮势(简称氮势)用  $N_p$  或  $r$  表示,由下式计算:

$$r = \frac{p_{\text{NH}_3}}{p_{\text{H}_2}^{1.5}}$$

式中:  $p_{\text{NH}_3}$  和  $p_{\text{H}_2}$  为气相中的氮分压和氢分压。由此可知:  $r$  值只取决于气相的组成。该式适用于纯氮、氮+氮分解气、氮+氢、氮+氮及氮+中性载气等不同气源的渗氮,也适用于低压渗氮。

##### 2. 氮分解率

气体渗氮时,通入炉中的氮分解为氢和活性氮原子的程度,称为氮分解率  $V$ ,一般以百分比值表示。氮分解率是气体渗氮的重要工艺参数。在一定渗氮温度下,氮分解率  $V$  取决于供氮流量,可由下式计算。供氮愈多,  $V$  愈低,气氛氮势愈高,工件表面氮含量愈高。供氮量固定时,渗氮温度愈高,  $V$  愈高,气氛氮势愈低。

$$V = 1 - p_{\text{NH}_3}$$

$V$  的测试仪是一个刻有体积百分数刻度的容积瓶,在测量时先将炉气充满容积瓶,然后向瓶内注水。由于氮几乎全部溶解在水中,因此瓶内水占的体积百分数即为炉气中氮的体积百分数,即等于炉气中氮的分压  $p_{\text{NH}_3}$ 。

##### 3. 临界氮势

气体渗氮过程中(在热力学平衡条件下),钢件表面形成化合物层所需的最低氮势,即临界氮势与钢的成分及



渗氮温度有关。

4. 氮势与氨分解率及炉气成分的关系

以纯氨为气源的氮势计算公式：

$$p_{\text{NH}_3} + p_{\text{H}_2} + p_{\text{N}_2} = 1$$

根据氨分解反应方程可得：

$$p_{\text{N}_2} = \frac{1}{3} p_{\text{H}_2}; V = 1 - p_{\text{NH}_3} = p_{\text{H}_2} + p_{\text{N}_2} = \frac{4}{3} p_{\text{H}_2}; p_{\text{H}_2} = \frac{3}{4} V = 0.75(1 - p_{\text{NH}_3})$$

$$r = \frac{p_{\text{NH}_3}}{p_{\text{H}_2}^{1.5}} = \frac{p_{\text{NH}_3}}{[0.75(1 - p_{\text{NH}_3})]^{1.5}}$$

或 
$$r = \frac{1 - V}{(0.75V)^{1.5}} \quad \text{或} \quad r = \frac{1 - \frac{4}{3} p_{\text{H}_2}}{p_{\text{H}_2}^{1.5}}$$

上述计算公式中， $p_{\text{NH}_3}$  或  $V$  一般用上述注水式  $\text{NH}_3$  分解率测试仪测定也可用红外仪测定， $p_{\text{H}_2}$  可用热导式仪表测试。

5. 氮势阈值

1) 定义 在实际生产条件下对应于一定的渗氮时间，在钢件表面形成化合物层的最低氮势称为氮势的阈值，它是渗氮时间的函数。渗氮时间愈长，氮势阈值愈低。T. Bell 用实测数据建立了 En-19(相当于 42CrMo) 钢的氮势阈值曲线，见图 3-23。氮势阈值的概念和阈值曲线对于制订可控渗氮工艺有着重大意义。

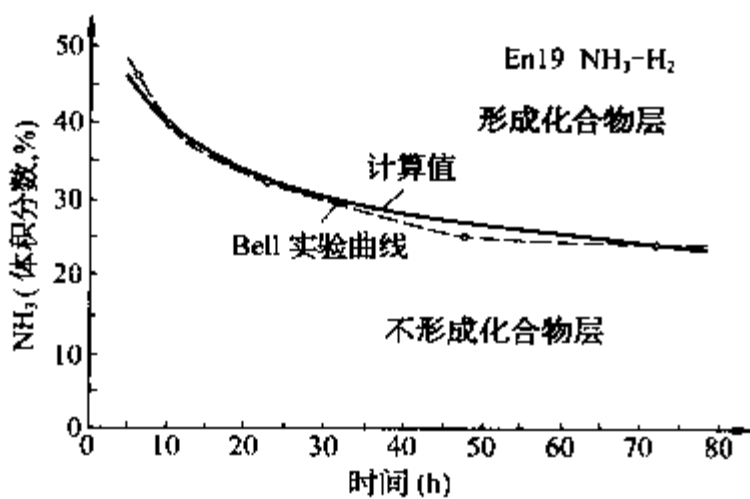


图 3-23 En-19 钢的氮势阈值曲线

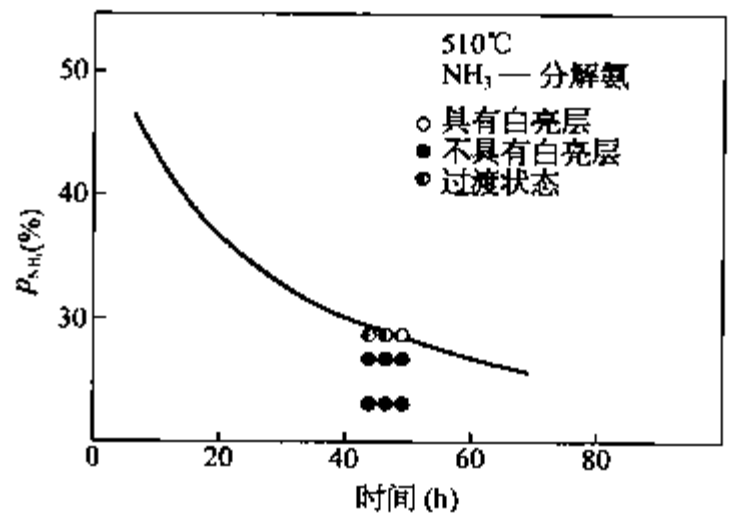


图 3-24 氮势阈值理论曲线与长时间渗氮的实测结果的比较

图中虚线表示 T. Bell 发表的实验曲线，实线是上海交通大学计算的理论曲线。

2) 氮势阈值曲线理论公式 为了推导氮势阈值曲线的数学表达式，需要运用气—固反应物质传递模型。导出的氮势阈值的数学表达式：

$$r_t = \frac{r_c}{1 - \exp\left(\frac{\beta^2 t}{D}\right) \cdot \text{erfc}\left(\frac{\beta\sqrt{t}}{\sqrt{D}}\right)}$$

式中： $r_t$  为渗氮时间  $t$  对应的氮势阈值； $r_c$  为出现化合物层的临界氮势； $\beta$  为气—固反应的传递系数； $D$  为按活度计算的扩散系数。

3) 测定阈值曲线的简捷方法

氮势阈值曲线是制订可控渗氮工艺的重要依据。但阈值曲线的位置受钢种、炉子结构和炉气流动情况等多种因素的影响，因此，制作氮势阈值曲线，工作量颇大。有了氮势阈值曲线的数学公式，就可用实验方法测出两个

不同时间  $t_1$  和  $t_2$  的氮势门槛值  $r_{n1}$  和  $r_{n2}$ , 分别代入数学表达式得:  $r_{n1} = \frac{r_c}{1 - \exp\left(\frac{\beta^2 t_1}{D}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\beta\sqrt{t_1}}{\sqrt{D}}\right)}$ ,  $r_{n2} =$

$\frac{r_c}{1 - \exp\left(\frac{\beta^2 t_2}{D}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\beta\sqrt{t_2}}{\sqrt{D}}\right)}$ , 解联立方程, 即可求得  $r_c$  和  $\frac{\beta}{\sqrt{D}}$  的值, 并可按数学表达式算出该钢件在同一渗

氮温度下对应于不同渗氮时间的氮势门槛值。将这些数据代入就可很方便地得出不同渗氮时间的门槛值, 如图 3-24 所示。图上也标出了长时间渗氮的实测结果, 它们与计算结果吻合。从而证明了这种测定门槛值曲线的简捷方法是正确的。

## 二、常用渗氮钢及其预备热处理

### 1. 常用渗氮钢(表 3-39)

表 3-39 常用渗氮钢

类别	材料牌号
碳素结构钢	Q235, 08, 08Al, 10, 15, 20, 20Mn, 35, 40, 45, 50
合金结构钢	18Cr2Ni4WA, 20Cr, 20CrMnMo, 20CrMnTi, 20Cr2Ni4, 20Cr2MoVA, 25Cr2Ni4WA, 30CrMnSiA, 30CrMo, 38CrMoAlA, 40Cr, 40CrMnMo, 40CrNiMoA, 42CrMo, 50CrVA
合金工具钢	Cr12, Cr12MoV, 3Cr2W8V, 5CrMnMo, 5CrNiMo, 4Cr5MoSiV1, 4Cr5W2VSi
高速工具钢	W18Cr4V, W6Mo5Cr4V2
不锈钢、耐热钢	12Cr13, 20Cr13, 30Cr13, 1Cr18Ni9Ti, 95Cr18, 14Cr11MoV, 42Cr9Si2, 40Cr10Si2Mo, 45Cr14Ni14W2Mo

### 2. 常用渗氮钢的预备热处理(表 3-40)

表 3-40 常用渗氮钢的预备热处理

材料	调质工艺			力学性能					备注
	淬火温度 (°C)	冷却介质	回火温度 (°C)	$R_m$ (MPa)	$R_p$ (MPa)	A (%)	Z (%)	$A_k$ (J)	
18Cr2Ni4WA	850~870	油	525~575	1170	1020	12	55	117	200~220 HBS
20CrMnTi	910~930	油	600~620	—	—	—	—	—	
20Cr3MoWV	1030~1080	油	660~700	880	730	12	40	—	
30Cr3WA	870~890	油	580~620	980	830	15	50	98	
30CrMnSi	880~900	油	500~540	1100	900	10	45	50	
30Cr2Ni2WVA	850~870	油	610~630	980	830	12	55	117	
35CrMo	840~860	油	520~560	1000	850	12	45	80	
35CrAlA	920~940	油或水	620~650	880	740	10	45	78	
38CrMoAlA	920~940	油	620~650	980	835	15	50	88	
40Cr	840~860	油	500~540	1000	800	9	45	60	
40CrNiMo	840~860	油	600~620	1000	850	12	55	100	
40CrNiWA	840~860	油	610~630	1080	930	12	50	78	
50CrVA	850~870	油	480~520	1300	1150	10	40	—	

(续表)

材 料	调 质 工 艺			力 学 性 能					备 注
	淬火温度 (°C)	冷却介质	回火温度 (°C)	$R_m$ (MPa)	$R_p$ (MPa)	A (%)	Z (%)	$A_k$ (J)	
3Cr2W8	1 050~1 080		600~620	1620	1430	11	38	34	
4Cr5MoV1Si	1 020~1 050		580~620	1830	1670	9	28	—	
5CrNiMo	840~860	油	540~560	1370	—	11	44	51	
Cr12MoV	980~1 000	油	540~560	—	—	—	—	—	52~54 HRC
W18Cr4V	1 260~1 310	油	550~570 (三次)	—	—	—	—	—	≥63 HRC
W6Mo5Cr4V2	1 200~1 240	油	550~570 (三次)	—	—	—	—	—	
20Cr13	1 000~1 050	油或水	660~670	600	450	16	55	80	
42Cr9Si2	1 020~1 040	油	700~780	900	600	19	50	—	固溶处理
1Cr18Ni9Ti	1 000~1 100	水	—	550	200	40	55	—	
14Cr11MoV	930~960	空冷	680~730	450	240	21	61	60	
45Cr14Ni14W2Mo	820~850	水	—	706	314	20	35	—	

### 三、气体渗氮

#### (一) 工件渗氮前的准备工作(表 3-41)

表 3-41 工件渗氮前的准备工作

内 容	方 法
设备检查	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 渗氮前对控温仪表、液氮瓶、流量计、压力计、氨分解测定仪、干燥罐、各种管路系统、电源系统以及微机控制系统等作全面检查,保证设备的正常运行和使用。炉内温差应小于±5°C</li> <li>2) 根据工件的形状、尺寸、质量和技术要求,准备给好工夹具,使用前应认真检查是否完好可靠,并清洗干净</li> </ol>
工件非渗氮面的防护	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 涂料法:在水玻璃中添加质量分数为10%~15%的石墨粉,搅拌均匀后涂刷,涂后阴干或在150°C烘干即可。一般涂刷2~3次,涂层厚为0.5~1.0 mm,并注意边角、棱角处涂匀,也可用锡粉:铅粉:氧化铬=3:1:1(质量比)用ZnCl<sub>2</sub>溶液调匀涂刷</li> <li>2) 热镀锡法:镀层厚度在0.004~0.008 mm,镀层太薄,会失去保护作用,镀层太厚,锡容易流淌到需要渗氮的表面上。锡的熔点(230°C)低,在渗氮温度下,会熔化成薄膜,被吸附在工件表面,阻止氮原子渗入</li> <li>3) 电镀金属法:在一般钢件非渗氮表面镀一层厚0.035~0.06 mm的青铜,在不锈钢表面镀一层0.025~0.1 mm厚的镍,可起防护作用</li> </ol>
工件的准备	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 渗氮工件的表面不得有油垢、污物、锈斑、划痕,不应有尖锐棱角。工件加工余量应符合工艺规定,通常,结构件渗氮表面的磨削余量单边应不大于0.05 mm。渗氮前须用汽油、酒精、丙酮等清洗后用清洁布或棉絮擦干,同时在1~2 h内装炉渗氮。对于那些不能及时处理的零件须涂油保护,以免生锈</li> <li>2) 对于易畸变的工件,应预先测畸变量,并做好记录</li> <li>3) 每炉渗氮件都应配置一枚或数枚(不同装炉部位)随炉试样。随炉试样应与待渗件的钢号、预备热处理工艺和表面粗糙度一致。试样应事先编号。试样规格一般为φ16~30 mm,φ<sub>内</sub>2~3 mm,厚度4~10 mm。重要工件的试样应在待渗件上截取</li> </ol>

(续表)

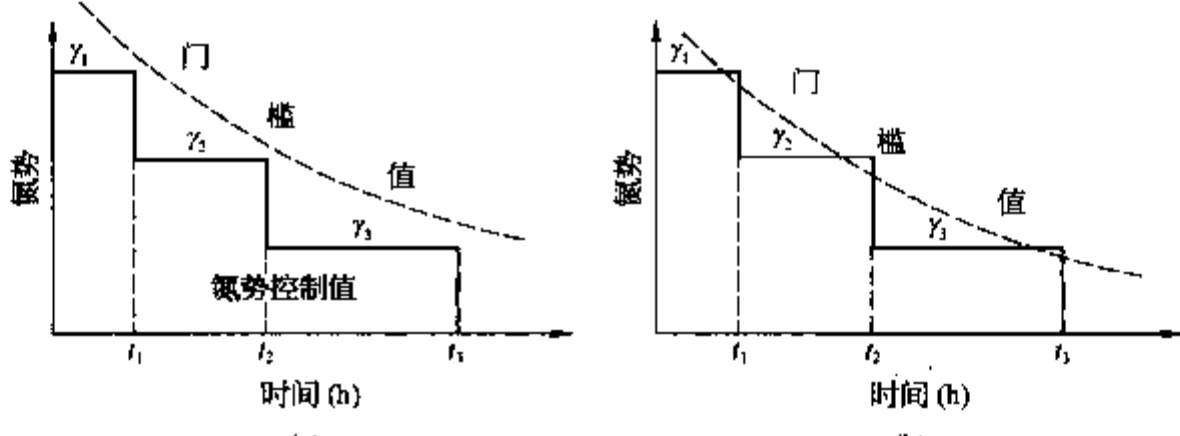
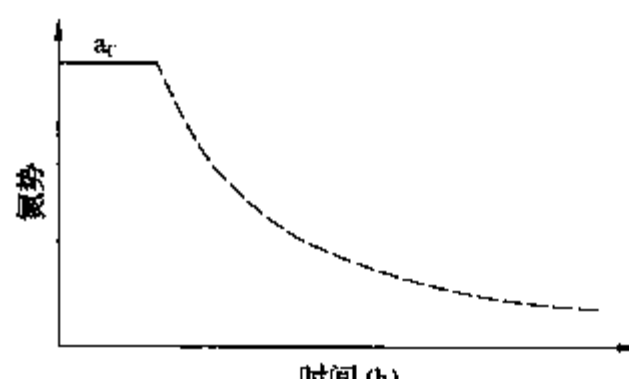
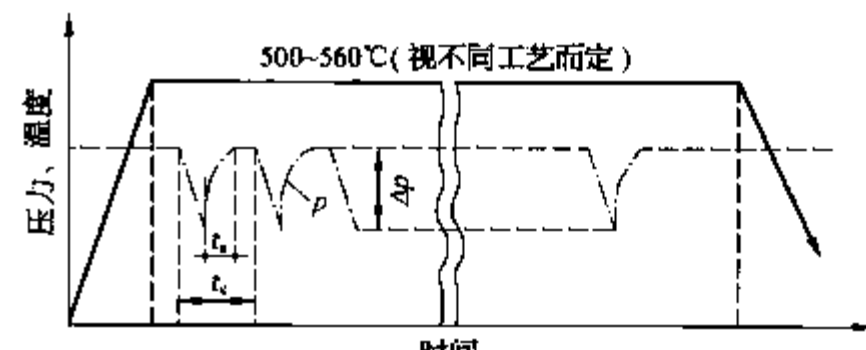
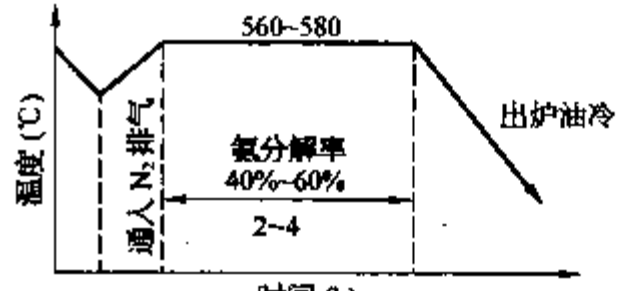
内 容	方 法
工件的 预备热处理	1) 一般结构钢采用调质处理,其中回火温度应高于渗氮温度 2) 对冲击韧性要求不高的工件可采用正火处理,正火的冷却速度不宜过慢 3) 工模具钢一般采用淬火+回火,回火温度应高于渗氮温度 4) 马氏体不锈钢、耐热钢常采用调质处理,奥氏体不锈钢可采用固溶处理 5) 精密和变形要求严格的零件,机加工过程中应进行一次或多次去应力退火,去应力退火温度比调质回火温度低,比渗氮温度高。工件校直后应进行去应力退火,相应温度比渗氮温度低 6) 预处理后工件显微组织和硬度符合技术要求和工艺规定,通常在表面 5 mm 内游离铁素体不大于 5%
装 炉	1) 检查吊装工具,发现问题应及时修理或更换 2) 将认真清洗干净的工件,按工艺要求平稳、牢固地装卡在吊装工具上 3) 将待渗氮件或装卡在吊装工具上的待渗氮件吊装在炉中有效加热区内 4) 为保证炉内气氛流通和温度均匀,应适当安排装炉量,工件在炉中位置及排列方向 5) 根据炉膛大小,每炉应在不同位置吊放有编号的试样

(二) 气体渗氮工艺(表 3-42)

表 3-42 常用气体渗氮工艺方法和特点

工艺名称	方 法 和 特 点
等温渗氮法	<p>又称为一段渗氮法,是在一定温度和一定氮势下进行的渗氮。适用于硬度要求高,畸变要求小的工件。渗氮速度随温度提高而加快。大于 510℃ 渗氮,渗层硬度下降,所以通常在 490~510℃ 温度下进行渗氮。渗氮时间按渗氮层深度确定</p>
二段渗氮法	<p>将渗氮过程分两个温度阶段保温的工艺。适用于渗氮层较深、硬度略低,工件尺寸和形状不易畸变并要求减少化合物层的工件。先在较低温度下渗氮,形成细小的沉淀物,然后在 550℃ 左右渗氮时不会明显长大</p>

(续表)

工艺名称	方法和特点
<p>氮势分段控制的可控渗氮工艺</p>	<p>以门檻值曲线为依据实行氮势分段控制。在渗氮初期采用与常规渗氮相同的高氮势,在即将出现白层前降至中氮势,保持一段时间,待又出现白层前再将氮势降低到与渗氮时间相对应的氮势门檻值。图 a 为无白层分段可控渗氮工艺曲线;图 b 是获得单相 <math>\gamma'</math> 渗氮层的工艺曲线。氮势超越门檻值曲线,在工件表层出现单相 <math>\gamma'</math> 相,其韧性虽不及无白层可控渗氮,但比常规渗氮好得多</p> 
<p>动态可控渗氮工艺</p>	<p>渗氮第一阶段按门檻值控制,使渗氮层内建立尽可能高的浓度梯度。随后进入第二阶段,令氮势按一定规律连续下降使表面氮浓度不再升高也不下降,达到控制表面氮浓度又保持最大的浓度梯度,形成氮原子向内扩散的最有利条件的“动态阶段”</p> 
<p>抗蚀渗氮工艺</p>	<p>常在 600~700℃ 进行短时间的一段渗氮法。可获得一定厚度(如 0.015~0.060 mm)致密的 <math>\epsilon</math> 相(渗氮白层)。渗氮件对潮湿空气、热蒸汽、气体燃烧产物和弱碱溶液具有较高的抗蚀能力。该工艺对各种钢均可得到良好的效果</p>
<p>脉冲渗氮工艺</p>	<p>明显改善工件内表层的渗氮均匀性,如可使盲孔、狭缝及深槽工件及散装小型工件渗氮均匀。炉温变动 <math>\pm 5^\circ\text{C}</math>。工艺参数有:脉冲幅度 <math>\Delta p</math> (如 80 kPa)、脉冲周期 <math>t_c</math>、升压时间 <math>t_a</math>、氮分解率(如 27%~29%)</p> 
<p>短时渗氮工艺</p>	<p>常用渗氮温度为 560~580℃,氮分解率 40%~60%,渗氮时间为 2~4 h,出炉油冷。对于易畸变和尺寸精度要求很高的工件或回火温度低于 560℃ 的钢种,渗氮温度和时间分别为 500~510℃ 和 3~10 h。由于化合物层很薄,脆性不大,工件耐磨性大幅度提高;可降低工件表面摩擦因数和抗擦伤能力,并提高疲劳强度和抗蚀性</p> 
<p>奥氏体渗氮工艺</p>	<p>典型的工艺参数:渗氮温度 650℃,时间约 2 h,氮分解率 60%~70%,渗氮后出炉油淬。淬火至室温渗层的组织为:<math>\epsilon</math> 相化合物层、过冷高氮奥氏体层、淬火马氏体层和扩散层。经 200~250℃ 时效处理,过冷高氮奥氏体发生分解,硬度提高至 950 HV 以上,<math>\epsilon</math> 相也发生时效,硬度达 1 000 HV 以上。适用于耐磨性要求很高的工件</p>

(三) 典型工件应用实例

1. 模数为 5 mm 的机床齿轮

材料：20CrMnTi 钢。

技术要求：渗氮层深度 0.45~0.55 mm，表面硬度 600~800 HV<sub>0.1</sub>。

渗氮工艺曲线(预先为调质组织)见图 3-25。

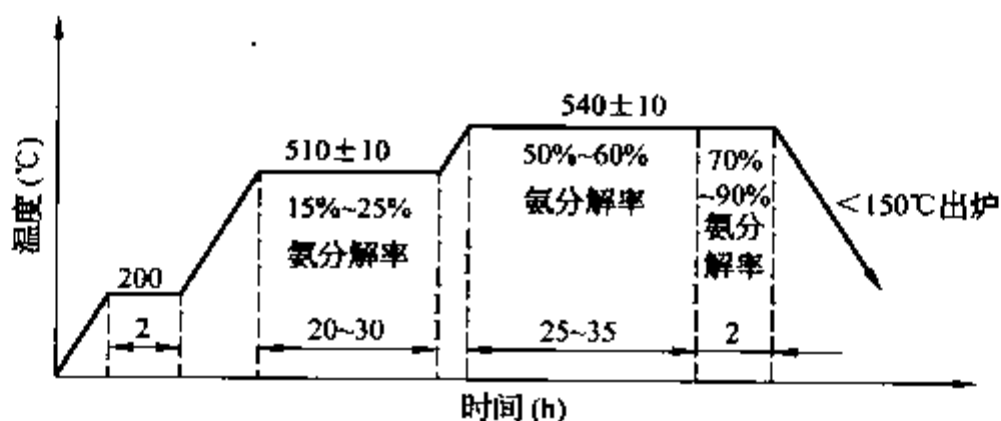


图 3-25 机床齿轮渗氮工艺曲线

2. 飞机油泵阀门与衬套

材料：45Cr14Ni14W2Mo 钢。

技术要求：渗氮深度 0.1~0.12 mm 渗层硬度 62 HRC。

预备热处理：1 040~1 060℃保温 30~60 min 水冷，然后在 (810±10)℃保温 3~4 h 空冷。

渗氮工艺曲线见图 3-26。

3. T615K 镗床镗杆(Φ150 mm×3 171 mm)

材料：38CrMoAlA 钢。

技术要求：表面硬度≥900 HV；渗氮层深度 0.45~0.65 mm；脆性 1~3 级；径向跳动≤0.08 mm。

工艺流程：锻造→退火→粗车(留截取金相试样长度)→调质→车(截取金相样品，并检查)→精车→粗刨→去应力时效→粗磨→渗氮→精磨→车螺纹→超精研磨。

渗氮工艺曲线见图 3-27。

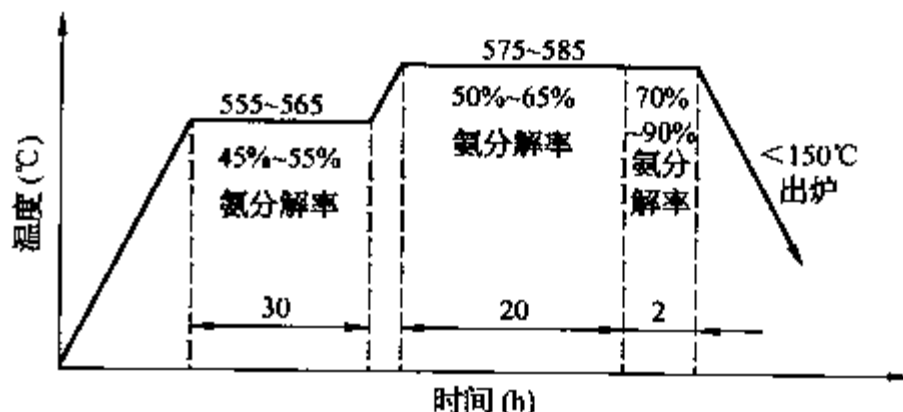


图 3-26 飞机油泵活门与衬套气体渗氮工艺曲线

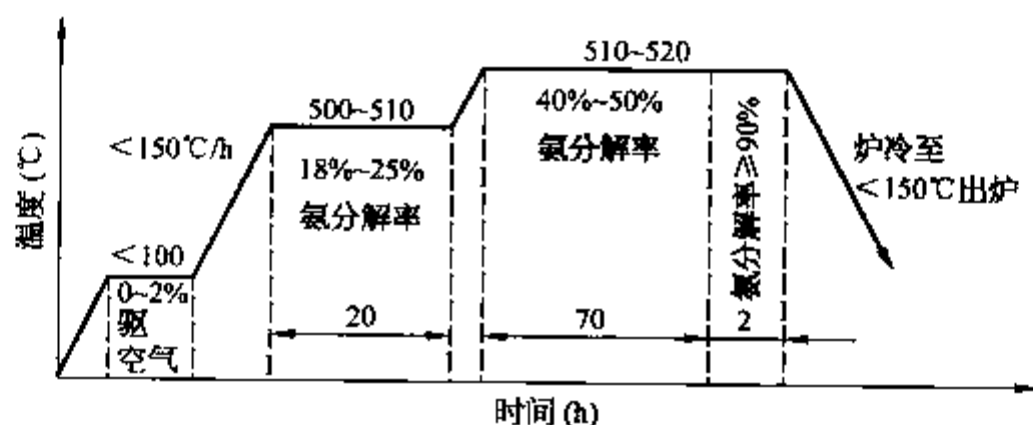


图 3-27 T615K 镗杆气体渗氮工艺曲线

4. 精密磨床主轴

材料：38CrMoAlA。

技术要求：渗氮层深度 0.4~0.6 mm；渗氮层硬度>900 HV。

工艺流程：锻造→正火→粗车→调质→精车→粗磨→渗氮→精磨。

工艺分析：正火温度 890℃，消除锻造应力和组织不均匀性，为调质做好准备，但也可用正火代替。

38CrMoAlA 钢脱碳倾向严重，各道工序必须留有较大的加工余量。

调质：淬火温度 930℃，保温时间(使铁素体充分溶解于奥氏体中)由炉子类型确定。然后在油或热水中冷却，淬火后的硬度为 45~50 HRC。高温回火温度：600~650℃，保温 4 h，在水中或油中冷却。检查样品的显微组织，调质后中心游离铁素体数量不应多于 5%；保证渗氮前组织为细小均匀的索氏体，硬度 24~35 HRC。

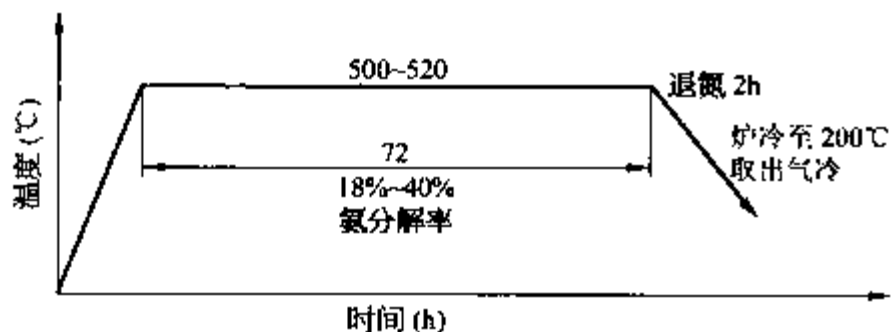


图 3-28 精密磨床主轴渗氮工艺曲线

精车留外圆磨量 0.9~1.0 mm，然后在 580℃进行去应力回火(保温时间 6h)。

粗磨(渗氮保留精磨量 0.06~0.08 mm)后渗氮。

渗氮工艺曲线见图 3-28。

#### 四、离子渗氮

##### (一) 工件渗氮前的准备工作(表 3-43)

表 3-43 离子渗氮前的准备工作

准备工作名称	具 体 说 明
离子渗氮设备的准备	1) 测试真空系统的压升率,应该检修合格 2) 用经定期校验合格的插入封闭内孔深度大于 30 mm 的热电偶或非接触温度仪表测温,热电偶热端到某一起辉表面距离不大于 2 mm 测定为该起辉表面的温度 3) 真空泵注意定期清洗换油,运行正常 4) 工作气压推荐用膜片式真空计测量,热导式电阻真空计用于测极限真空度和压升率 5) 应用质量流量计或经相同气体标定的在正压下工作的转子流量计测量进气流量
气 源	1) 推荐采用氮氢混合气、热分解氨或氨气 2) 氮氢气符合 GB/T7445、8979(或 JB/T7530)规定,纯度不低于 99.9% 3) 氨气符合 GB536 中一等品的要求 4) 进气气压应大致恒定,压强不大于 0.1 MPa
试样制备	1) 每炉应带有随炉试样数件 2) 试样牌号、预备热处理工艺和表面粗糙度应与待渗工件一致 3) 检验脆性的试样 Ra 为 0.4 μm
待渗件的预备热处理	一些材料的预备热处理工艺见表 3-40

##### (二) 离子渗氮工艺(表 3-44)

表 3-44 离子渗氮工艺

工艺规范和工序	具 体 说 明									
离子渗氮工艺规范	1) 渗氮温度：按待渗件材料、渗层硬度和深度、畸变、基体硬度和工件结构综合考虑，常用材料的渗氮温度、渗层深度和硬度见表 3-45 2) 保温时间由待渗件材料、渗氮温度和深度确定 3) 气压范围：100~1 000 Pa,应考虑温度均匀程度和防止产生辉光集中 4) 氨气流量：与设备整流输出电流、装炉量和渗氮时间相关,前两者大和后者短时取上限									
	<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>整流输出电流(A)</td> <td>10~25</td> <td>25~50</td> <td>50~100</td> <td>100~150</td> </tr> <tr> <td>合理供氨量(mL/min)</td> <td>100~200</td> <td>200~350</td> <td>350~650</td> <td>650~1 100</td> </tr> </table>	整流输出电流(A)	10~25	25~50	50~100	100~150	合理供氨量(mL/min)	100~200	200~350	350~650
整流输出电流(A)	10~25	25~50	50~100	100~150						
合理供氨量(mL/min)	100~200	200~350	350~650	650~1 100						
	5) 电流密度：一般为 0.5~5 mA/cm <sup>2</sup>									

(续表)

工艺规范和工序	具体说明
待渗工件的装炉	1) 根据待渗件形状、尺寸和质量准备专用或通用夹具 2) 按工件形状和结构要素,炉内散热条件和辉光放电电流密度分布规律确定装炉方案 3) 工件间距合适,满足形成辉光所需间距和温度均匀度要求 4) 清理待渗件,去除油污、锈斑、残存切屑和其他污物,在 350℃电阻炉中烘烤的效果更佳 5) 防渗部位和不需渗氮小孔及狭缝用铜件覆盖屏蔽或用专用涂料保护 6) 套筒类工件的内孔渗氮时,其下部应架空,套筒长径比为 8~16 时,套筒内应设辅助阳极;当比值大于 16 时,还需将渗氮气体引入筒内 7) 待渗件温度可能偏低部位应设置辅助阴极或阳极 8) 炉内安放的试样力求与待渗件的温度基本一致
渗氮过程操作	1) 气压小于 30 Pa 时点燃辉光,逐渐升高电压和气压进行可控的辉光放电清理和升温 2) 对易畸变的渗氮件在 400℃以上时应缓慢升温 3) 及时开启循环水冷系统,出水温度应不大于 60℃ 4) 临近保温温度时和达到保温温度后的 2~3 h 内应经常熄灭辉光和目测温度,严防超温。当温度均匀度发生误差时要及时调整 5) 整炉工件温度均匀,在保温期间应不大于±15℃,整炉装同种工件时应不大于±10℃,如有超差时通过调整气压以求改善 6) 升温 and 保温阶段每小时记录温度、电流、电压、流量和气压等参数 7) 停炉:切断辉光电源,关闭供气和抽气阀门,工件在渗氮气氛中随炉冷却,对易产生氢脆工件应抽去渗氮气体,在真空中冷却 8) 出炉:工件温度小于 200℃时可充入空气出炉 9) 出炉工件未渗氮部位应及时涂油防锈 10) 畸变超差工件经整体或局部加热后方可校直,加热温度应低于渗氮温度,校正后应去应力退火

表 3-45 常用材料的渗氮温度、渗氮后表面硬度和深度范围

材 料		预备热处理		离子渗氮技术要求		常用渗氮温度 (℃)
类 别	牌 号	工 艺	硬 度 (不低于)	表面 硬度 HV (不低于)	一般深度 范围(mm)	
碳 钢	45	正 火	215 HBW	250	0.20~0.60	550~570
合金 结构钢	20Cr	调 质	215 HB	550	0.2~0.50	510~540
	40Cr	调 质	235HB	500		
	20CrMnTi	调 质	215HB	600		
	35CrMo	调 质	28 HRC	550		
	42CrMo	调 质	28 HRC	550		
	35CrMoV	调 质	28 HRC	550		
渗氮钢	38CrMoAl	调 质	255 HB	850	0.3~0.60	等温渗氮: 510~560 二段渗氮: 480~530+550~570



(续表)

材 料		预备热处理		离子渗氮技术要求		常用渗氮温度 (°C)
类 别	牌 号	工 艺	硬度 (不低于)	表面 硬度 HV (不低于)	一般深度 范围(mm)	
合金 工模具钢	3Cr2W8V	调 质	396 HB	800	0.15~0.30	520~560
		淬火+回火	45 HRC	900	0.10~0.25	
	5CrNiMo	淬火+回火	41 HRC	600	0.20~0.40	
	5CrMnMo	淬火+回火	41 HRC	650	0.20~0.40	510~530
	4Cr5MoSiV1	淬火+回火	48 HRC	900	0.10~0.40	
	Cr12MoV	淬火+回火	59 HRC	1000	0.10~0.20	
	W18Cr4V	淬火+回火	64 HRC	1000	0.02~0.10	
不锈钢和 耐热钢	1Cr18Ni9Ti	固溶处理		1000	0.01	420~450
				900	0.08~0.15	560~600
	20Cr13	淬火+回火	235 HB	850	0.10~0.30	540~570
	14Cr11MoV	淬火+回火	280 HB	650	0.20~0.40	520~550
	42Cr9Si2	淬火+回火	30 HRC	850	0.10~0.30	520~560
	45Cr14Ni14W2Mo	退 火	235 HB	700	0.06~0.12	540~580
灰铸铁	HT200, HT250	退 火	200 HB	300	0.10~0.30	540~570
球墨铸铁	QT600-3, QT700-2	正 火	235 HB	450	0.10~0.30	540~570

(三) 典型工件应用实例

一些零件离子渗氮的应用结果见表 3-46。

表 3-46 离子渗氮的典型应用实例

零件名称	工作条件	材料及原热处理工艺、存在问题	离子渗氮应用情况				
			材料及预备热处理	渗氮工艺	表面硬度	渗氮层厚度(mm)	应用效果
柴油机连杆铰刀 (φ4 mm)		W18Cr4V, 淬火回火	W18Cr4V, 淬火回火	500~520°C ≤30 min	870~ 1090 HV	0.01~ 0.03	寿命提 高 5 倍
冷冻机阀片	承受冲击 疲劳载荷, 720 次/min	30CrMnSi, 淬火回火, 46~ 54 HRC 寿命低	30CrMnSi, 基体硬度 37~ 41 HRC	380~420°C, 100~120 min	61~ 65 HRC	0.10~ 0.12	寿命提 高 3 倍以 上
大齿轮 (φ455 mm× 25 mm)	精密传动	20CrMnTi, 渗碳淬火发生 翘曲畸变报废, 改用 38CrMoAl 钢气体渗氮, 周 期太长	20CrMnTi	550°C, 6 h	830 HV	0.4	畸变符 合要求, 生产周期 缩短
高速锤精压 叶片模	挤压叶片 材料 20Cr13	3Cr2W8V, 淬火回火, 使用 寿命低	3Cr2W8V, 淬火回火, 硬度 48~52 HRC	540°C, 12 h	66~ 68 HRC	0.4	脱模容 易, 叶片光 洁, 寿命提 高数倍

## 1. T649A 镗铣床镗杆

材料: 38CrMoAlA 钢。

技术要求: 渗氮层表面硬度 $\geq 900$  HV; 渗氮层深度 0.5 mm。

工艺流程: 下料→正火→车→调质→车→去应力处理→粗磨→稳定化处理→离子渗氮→精磨→稳定化处理→研磨→成品。

渗氮工艺: 520~530℃保温 20 h 再升温至 560~570℃保温 10 h, 氨气在 800℃热分解后供给流量为 0.5~0.7 L/min, 压力为  $2.67 \times 10^2$  Pa。

2. 钻井机械转盘齿轮( $\phi 1160$  mm, 端面模数 20 mm)

材料: 35CrMo 钢。

技术要求: 渗氮层深度 0.4~0.5 mm; 表面硬度 $\geq 500$  HV<sub>10</sub>; 脆性小于 3 级。

工艺流程: 锻造→正火→粗加工→去应力退火→精加工→渗氮→精加工→成品。

渗氮工艺: (在 LD-500B2 离子渗氮炉内进行) 工件经清理后升温至 510~520℃, 分解氨 267~534 Pa 下渗氮 18~24 h, 后在通氨条件下冷却。

## (四) 离子渗氮件的质量检查

离子渗氮件质量检查的项目及内容见表 3-47。

表 3-47 离子渗氮件的质量检查

检验项目	检 验 内 容
外 观	1) 工件渗氮表面不应有裂纹、剥落和明显的电弧烧伤痕迹 2) 表面色泽为银灰色或暗灰色
硬 度 (按 GB/T4340.1、17394 规定)	1) 表面硬度采用试验力为 9.8~98 N 的维氏硬度计测量; 渗层深度小于 0.3 mm, 符合 GB/T9451 规定, 维氏硬度试验力不大于 49 N; 渗层深度 $\geq 0.3$ mm, 试验力不小于 49 N 2) 测量化合物层硬度用试验力为 0.49~1.96 N 的显微维氏硬度计 3) 大型工件渗氮层表面硬度可用“C”测头的里氏硬度计测量, 测量部位粗糙度应 $\leq 0.4 \mu\text{m}$ 4) 渗氮件表面硬度应达技术要求, 硬度偏差值对单件 $\leq 600$ HV 和 $>600$ HV 硬度值的允许值分别为 45 HV 和 60 HV, 对同批件相应分别为 70 HV 和 100 HV 5) 表面硬度检测应抽验渗氮件, 也可用同炉试样代替并加注明 6) 留加工余量的渗氮件(试样)磨出余量后测试, 符合技术要求
深 度	1) 在渗氮件或随炉试样上测定并符合技术要求 2) 渗氮层深度偏差对 $\leq 0.3$ mm、 $>0.3 \sim 0.6$ mm 和 $>0.6$ mm 的单件偏差为 0.05 mm、0.10 mm 和 0.15 mm; 对相同深度的同批件偏差为 0.1 mm、0.15 mm 和 0.20 mm 3) 检验按 GB/T4340.1、11354 和 18449.1 规定执行
脆性和金相	渗氮层脆性、疏松级别和扩散层中氮化物级别按 GB/T11354 执行
防渗检查	工件防渗部位的硬度增高, 以不影响后续加工为合格
畸 变	应符合图样和工艺要求; 进行校正应采用热校并立即进行去应力退火和探伤

## 五、渗氮件的质量检验

## 1. 原始组织检查

对不同服役条件的渗氮零件和不同牌号的钢材, 在渗氮前可采取不同的预备热处理以获得相应的原始组织。

对调质钢, 渗氮前的原始组织级别按索氏体中游离铁素体数量分为 5 级, 在显微镜下放大 500 倍, 参照原始组织级别图进行评定, 一般零件 1~3 级为合格, 重要零件 1~2 级为合格。渗氮工件的工作面不允许有脱碳层或粗大的索氏体组织。

## 2. 渗氮件质量检验的项目与内容(表 3-48)(其余内容参见第八章)

表 3-48 渗氮件的质量检验

检查项目	检 验 内 容
外观检验	正常的渗氮工件表面不应出现严重的氧化色及其他非正常颜色。如果表面出现金属光泽,则说明工件的渗氮效果欠佳。离子渗氮件表面色泽应均匀,钢铁零件离子渗氮表面应为银灰色或暗灰色。钛及钛合金零件应为金黄色。离子渗氮件表面不得有亮点、亮块或软点、软块,表面不允许有裂纹、剥落、伤痕、锈迹、花斑,不得有电弧烧伤等缺陷
渗层深度检验	渗氮层深度测定方法有断口法、硬度梯度法和金相法,以硬度梯度法作为仲裁方法。 断口法是将缺口的试样打断,根据渗氮层组织较细呈瓷断口而心部组织较粗呈塑性破断的特征,用 25 倍放大镜进行测量。此法方便迅速,但精度较低。 采用金相法测得的渗氮层深度,一般较硬度梯度法所测值稍浅
硬度检验	渗氮层表面硬度可用维氏硬度计或轻型洛氏硬度计测量
脆性检验	渗氮层脆性多用维氏硬度压痕的完整性来评定,一般零件 1~3 级合格,重要零件 1~2 级合格。对于渗氮后留有磨量的零件,也可在磨去加工余量后的表面上测定。 要求维氏硬度压痕在放大倍数为 100 倍的放大镜下进行检验,每件至少测 3 点,其中 2 点以上处于相同级别时,才能定级,否则,需重复测定 1 次
疏松检验	渗氮层疏松按表面化合物内微孔的形状、数量密集程度分为 5 级。 检测方法:将渗氮金相试样经腐蚀后在显微镜下放大 500 倍检验,取其疏松最严重的部位,参照渗氮层疏松级别图进行评定,一般零件 1~3 级为合格,重要零件 1~2 级为合格
氮化物级别	渗氮层中氮化物级别按扩散层中氮化物的形态、数量和分布情况分为 5 级。 检测方法:在显微镜下放大 500 倍进行,取其组织最差部位,参照级别图进行评定,一般零件 1~3 级合格,重要零件 1~2 级合格
抗蚀性能检验	对抗蚀渗氮件还必须进行抗蚀性能检查,抗蚀性能根据 $\epsilon$ 相层的厚度和致密度进行评定。耐蚀性的常用检查方法有以下两种: 1) 硫酸铜水溶液浸渍或液滴法,将试样浸入 $\text{CuSO}_4$ 6%~10% 的水溶液中保持 1~2 min,试样表面无铜沉淀为合格 2) 赤血盐——氯化钠水溶液浸渍或液滴法,取 10 g $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 及 20 g $\text{NaCl}$ 溶于 1 L 蒸馏水,渗氮试样浸入该溶液中保持 1~2 min,无蓝色印迹为合格 抗蚀渗氮件 $\epsilon$ 相致密层厚度应不小于 0.01 mm
尺寸及畸变检查	工件经渗氮处理后尺寸略有膨胀,其长大量约为渗氮层深度的 3%~4%。渗氮件的畸变量远较渗碳、淬火等处理的畸变小,适当的预处理、装炉方式及工艺流程可将畸变量降至最小。渗氮后需精磨的工件,其最大畸变处的磨削量不得超过 0.15 mm

## 六、渗氮件的常见缺陷、产生原因及防止措施

工件渗氮处理后产生的缺陷涉及外观、几何尺寸、组织结构、力学性能及抗蚀性能等,有些是多种因素综合影响的结果,情况往往比较复杂,因此必须针对具体情况进行分析。

渗氮件常见缺陷、产生原因及防止措施见表 3-49。

表 3-49 渗氮件常见缺陷及对策

缺陷特征	产生原因	对 策
工件表面氧化色	冷却时供氮不足,管内出现负压,渗氮罐漏气,压力不正常,出炉温度过高。 干燥剂失效,氮中含水量过高,管道中存在积水	适当增加氮流量,保证罐内正压,保证罐内压力正常。 工件炉冷至 200℃ 以下出炉

(续表)

缺陷特征	产生原因	对策
表面腐蚀	氯化铵(或四氯化碳)加入量过多,挥发太快	除不锈钢和耐热钢外,尽量不加氯化铵,加入的氯化铵应与硅砂混合,以降低挥发速度
渗氮层硬度低	温度过高;分段渗氮时第一段温度太高;氨分解率过高或中断供氨;炉子的炉盖等处密封不良而漏气;渗氮罐使用过久;工件表面油污未清除	校验仪表,调整炉温;降低第一段温度;调整并稳定氨分解率;保证渗氮罐密封性能;新渗氮罐应经过预渗,长久使用的渗氮罐(包括夹具)均应进行退氮处理,以保证分解率正常;渗氮前严格进行除油、除锈处理
渗氮件表面有亮点、软点、硬度(或渗层)不均匀	工件表面油污或氧化皮未清洗(理)干净;材料组织不均匀;装炉量太多或工件吊挂不当;炉温、炉气不均匀;离子渗氮(零件狭缝、小孔)屏蔽不当;有锡、铜、锌、水玻璃等溅射到零件表面	清洗去污,消除零件表面氧化皮;合理装炉;改进炉子设计,降低罐内温差,强化炉气循环;离子渗氮时,不允许零件屏蔽物上有非铁物质。合理屏蔽狭缝小孔
渗氮层脆性大	渗氮时工件表面脱碳,或者渗氮前(如38CrMoAlA)的调质处理时发生脱碳;氨势过高	提高渗氮罐密封性,降低氨中含水量,提高预先热处理质量;提高氨分解率,降低氨势;离子渗氮的可在冷却时,采用氩轰击退氮
渗氮层网状或针状、脉状氮化物	渗氮温度过高,氨势过高,氨含水量大,原始组织粗大;表面脱碳层未加工掉;渗氮件表面粗糙,存在尖角、棱边;调质后的游离铁素体(体积分数)大于5%	控制温度和氨势以及氨含水量;零件不允许有尖角,减少工件非平滑过渡;增加预备热处理后的加工余量,调质后应该是回火索氏体组织
渗氮层太浅	温度(尤其是两段渗氮的第二段)偏低;保温时间短;氨势(氨分解率)不稳定;工件未进行调质预处理;新换渗氮罐或渗氮罐(或夹具)使用太久;装炉不当,气流循环不畅;离子渗氮真空度低	适当提高温度。校正仪表及热电偶;酌情延长时间;调整氨势(氨分解率);渗氮之前工件进行调质处理,以获得均匀致密的回火索氏体组织;新渗氮罐应预渗,长久使用的渗氮罐(或夹具)应进行退氮处理;合理装炉,调整工件之间的间隙;检查炉气漏气、供气情况
渗氮件畸变超差	1) 机加工产生的应力较大,在渗氮加热时应力松弛;零件细长或形状复杂 2) 渗氮层体积膨胀,渗层中含氮量高,渗氮层厚 3) 工件自重的影响或装炉方式不当 4) 气相氨势的影响	<p>渗氮前预备热处理中,安排合理的去应力工序,对于尺寸精度要求比较高的零件要安排二次去应力处理。第一次去应力预留1mm加工余量,第二次去应力预留0.15~0.3mm加工余量,也可视具体工件,经试验和生产经验而定。去应力温度应高于渗氮温度而略低于调质处理的回火温度,保温时间一般以大于8h为宜。去应力处理后不允许进行校直,若校直必须重新进行去应力处理。细长件去应力后最好使之处于垂直状态。对于细长的轴类零件可加工“工艺孔”。</p> <p>对单边开键槽的轴类零件,可在键槽对称的位置上开一个同样形状与尺寸的键槽,称为“工艺槽”。</p> <p>选用合理的渗氮层深度,注意渗氮处理的升温操作,采用升温至略低于渗氮温度,保温适当时间后再缓升至渗氮温度,使工件温度趋于均匀后再通氨气。必要时改进渗氮炉结构,使气氛均匀。</p> <p>必须合理装炉,装炉力求均匀;杆件吊挂平稳且与轴线平行,必要时设计专用夹具或吊具。</p> <p>在渗氮温度和时间相同的情况下,气相氨势愈高,渗氮件畸变愈大,所以建议采用可控渗氮方法</p>

## 第四节 碳氮共渗与氮碳共渗

碳氮共渗和氮碳共渗的定义和方法见表 3-50。

表 3-50 碳氮共渗和氮碳共渗的定义和方法

序号	方法名称	定义
1	碳氮共渗	在奥氏体状态下同时将碳、氮渗入工件表层,并以渗碳为主的化学热处理工艺
	气体碳氮共渗	在含碳、氮的气体介质中进行的碳氮共渗
	液体碳氮共渗	在一定温度下以含氰化物的熔盐为介质进行的碳氮共渗
	离子碳氮共渗	在低于 $1 \times 10^5$ Pa(常用 $10 \sim 10^{-1}$ Pa)的含碳、氮气体中,利用工件(阴极)和阳极之间的辉光放电进行的碳氮共渗
2	氮碳共渗	工件表层同时渗入氮和碳,并以渗氮为主的化学热处理工艺
	气体氮碳共渗	在气体介质中进行的氮碳共渗
	液体氮碳共渗	在盐浴中进行的氮碳共渗

### 一、气体碳氮共渗

#### (一) 气体碳氮共渗前的准备工作

可以参照固体渗碳前的准备阶段工作(表 3-21)和气体渗碳前的准备阶段工作(表 3-26)。

#### (二) 气体碳氮共渗工艺

气体碳氮共渗介质可参考表 3-51 进行选定,相应介质见 JB/T9209。

表 3-51 常用的气体碳氮共渗介质

类别	介质组分(体积分数)	说明
液体有机化合物+ $\text{NH}_3$	1) 煤油+ $\text{NH}_3$ (约占 25%~40%) 2) 甲醇+丙酮+ $\text{NH}_3$ (约占 25%~30%)	1) 煤油+ $\text{NH}_3$ 应用最广泛 2) 换气次数一般以 2.5~5 次为好(大炉罐取小值,小炉罐取大值)
含氮有机化合物	1) 丙酮+甲醇+尿素[( $\text{NH}_2$ ) $_2$ CO] 2) 三乙醇胺+甲醇 3) 三乙醇胺[( $\text{C}_2\text{H}_4\text{OH}$ ) $_3$ N] 4) 甲醇+甲酰胺( $\text{HCONH}_2$ ) 5) 苯胺( $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ )	1) 三乙醇胺在 200~300℃会形成沥青状物堵塞滴管,故在入炉处要加水冷却,但加甲醇可以防止堵塞 2) 也可以用注射泵喷射入炉 3) 为增加尿素流动性,可加热至 70~100℃
气体渗碳剂+氮气	吸热式气氛(露点 0~-5℃)+富化气(甲烷 5%~10%,丙烷 1%~3%或城市煤气 10%)+氮气(1.5%~5%)	1) 吸热式气氛的露点可根据碳势要求调整 2) 煤气应去水脱硫 3) 换气次数 6~10 次左右(大炉罐取小值,小炉罐取大值)

气体碳氮共渗的工艺操作见表 3-52。

表 3-52 气体碳氮共渗热处理工艺操作

工序及处理参数	具 体 说 明																																														
共渗温度(一般为 820~880℃)	1) 共渗温度取决于钢种、渗层深度和使用性能要求等 2) 选择原则: 低的合金元素含量、薄的渗层、较高的表面氮浓度、较小的畸变量和残留奥氏体量时宜选用较低共渗温度、较低的 NH <sub>3</sub> 量; 反之则选较高共渗温度																																														
共渗时间 t(h) 渗层深度 δ(mm)	1) t 与 δ 的关系为 $\delta = K\sqrt{t}$ 2) K 为常数, 在 860℃ 气体碳氮共渗下不同钢种的 K 值见下表: <table border="1" data-bbox="495 832 1779 984"> <thead> <tr> <th>钢 号</th> <th>20</th> <th>20Cr</th> <th>40Cr</th> <th>20CrMnTi</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>K</td> <td>0.28</td> <td>0.30</td> <td>0.37</td> <td>0.32</td> </tr> </tbody> </table> 3) 850℃ 共渗时渗层深度与共渗时间见下表: <table border="1" data-bbox="495 1071 1779 1217"> <thead> <tr> <th>δ(mm)</th> <th>0.2~0.3</th> <th>0.4~0.5</th> <th>0.6~0.7</th> <th>0.8~1.0</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>t(h)</td> <td>1~1.5</td> <td>2~3</td> <td>4~5</td> <td>7~9</td> </tr> </tbody> </table>	钢 号	20	20Cr	40Cr	20CrMnTi	K	0.28	0.30	0.37	0.32	δ(mm)	0.2~0.3	0.4~0.5	0.6~0.7	0.8~1.0	t(h)	1~1.5	2~3	4~5	7~9																										
钢 号	20	20Cr	40Cr	20CrMnTi																																											
K	0.28	0.30	0.37	0.32																																											
δ(mm)	0.2~0.3	0.4~0.5	0.6~0.7	0.8~1.0																																											
t(h)	1~1.5	2~3	4~5	7~9																																											
炉气调节和渗剂通入操作	1) 空炉升温到 600℃ 启动风扇 2) 工件装炉后立即通入较多渗剂排气, 推荐用甲醇、乙醇或氮气, 以防工件氧化, 800℃ 通入共渗渗剂 3) 排气完毕后正常保温 50~60 min, 关闭进出气孔 10 min 后取气分析, 炉气符合下表要求: <table border="1" data-bbox="495 1517 1791 1662"> <thead> <tr> <th>成 分</th> <th>CO<sub>2</sub></th> <th>O<sub>2</sub></th> <th>C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub></th> <th>CO</th> <th>H<sub>2</sub></th> <th>C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub></th> <th>N<sub>2</sub></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>体积分数(%)</td> <td>≤0.5</td> <td>≤0.5</td> <td>6~10</td> <td>5~6</td> <td>60~80</td> <td>≤0.5</td> <td>余量</td> </tr> </tbody> </table> 4) 氮气的干燥: 用 0.5 mm 分子筛或硅胶吸水, 分子筛和硅胶定期在 200℃ 左右烘干 3 h 以上脱水 5) 气体介质流量: 约 6~10 倍炉罐容积/h(小炉罐取上限值, 大炉罐取下限值) 6) 渗剂通入量(共渗保温阶段, 840~850℃ 时): <table border="1" data-bbox="495 1843 1791 2207"> <thead> <tr> <th>井式炉型号</th> <th>RQ3-25-9</th> <th>RQ3-35-9</th> <th>RQ3-60-9</th> <th>RQ3-75-9</th> <th>RQ3-105-9</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>炉罐尺寸(mm)</td> <td>φ300×450</td> <td>φ300×600</td> <td>φ450×600</td> <td>φ450×900</td> <td>φ600×1200</td> </tr> <tr> <td>排气阶段, 甲醇(滴/min)</td> <td>106</td> <td>120</td> <td>160</td> <td>200</td> <td>240</td> </tr> <tr> <td>煤油(滴/min)</td> <td>55</td> <td>60</td> <td>90</td> <td>100</td> <td>160</td> </tr> <tr> <td>NH<sub>3</sub> (m<sup>3</sup>/h)</td> <td>0.08</td> <td>0.10</td> <td>0.17</td> <td>0.25</td> <td>0.35</td> </tr> </tbody> </table> 注: 1. 滴注式: NH <sub>3</sub> 占炉气总量的 25%~35%, 炉气压力 200~400 Pa; 2. 吸热式: NH <sub>3</sub> 占炉气总量的 2%~3.5%, 炉气压力 150~500 Pa, 贯通式炉压在 40~200 Pa 7) 共渗炉排出废气必须点燃, 草黄色, 火焰高度 100~120 mm, 不得有明亮火星(炭黑)出现	成 分	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub>	N <sub>2</sub>	体积分数(%)	≤0.5	≤0.5	6~10	5~6	60~80	≤0.5	余量	井式炉型号	RQ3-25-9	RQ3-35-9	RQ3-60-9	RQ3-75-9	RQ3-105-9	炉罐尺寸(mm)	φ300×450	φ300×600	φ450×600	φ450×900	φ600×1200	排气阶段, 甲醇(滴/min)	106	120	160	200	240	煤油(滴/min)	55	60	90	100	160	NH <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /h)	0.08	0.10	0.17	0.25	0.35
成 分	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>2n+2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>2n</sub>	N <sub>2</sub>																																								
体积分数(%)	≤0.5	≤0.5	6~10	5~6	60~80	≤0.5	余量																																								
井式炉型号	RQ3-25-9	RQ3-35-9	RQ3-60-9	RQ3-75-9	RQ3-105-9																																										
炉罐尺寸(mm)	φ300×450	φ300×600	φ450×600	φ450×900	φ600×1200																																										
排气阶段, 甲醇(滴/min)	106	120	160	200	240																																										
煤油(滴/min)	55	60	90	100	160																																										
NH <sub>3</sub> (m <sup>3</sup> /h)	0.08	0.10	0.17	0.25	0.35																																										
共渗后的冷却处理	1) 渗后冷却方式: 出炉空冷; 冷却坑缓冷 2) 后续工序: 清洗、变形检查、校正																																														

(三) 典型工件应用实例(表 3-53)

表 3-53 典型工件应用实例

工件名称	工 艺 曲 线	技术要求或结果																				
缝纫机摆梭 (材料: 15 钢或 Q235 - B.F)	<p style="text-align: center;">(RQ3-75-9 井式炉)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>参考用量</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>甲醇 (滴/min)</td> <td>≈180</td> <td>—</td> <td>—</td> </tr> <tr> <td>三乙醇胺 (滴/min)</td> <td>—</td> <td>≈180</td> <td>≈120</td> </tr> <tr> <td>煤油 (滴/min)</td> <td>—</td> <td>100~140</td> <td>≈80</td> </tr> <tr> <td>炉压 (Pa)</td> <td>—</td> <td>400~600</td> <td>≈300</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">注: 1. 淬火后经沸水清洗后再在油中回火; 2. 100 滴 ≈ 3.5 mL</p>	参考用量				甲醇 (滴/min)	≈180	—	—	三乙醇胺 (滴/min)	—	≈180	≈120	煤油 (滴/min)	—	100~140	≈80	炉压 (Pa)	—	400~600	≈300	渗层: 0.5~0.6 mm 硬度: 509~795 HV
参考用量																						
甲醇 (滴/min)	≈180	—	—																			
三乙醇胺 (滴/min)	—	≈180	≈120																			
煤油 (滴/min)	—	100~140	≈80																			
炉压 (Pa)	—	400~600	≈300																			
石油钻机机械重载荷销轴 (材料: 20Cr2Ni4A)	<p style="text-align: center;">(RJ1-75-9 井式炉)</p>	总渗层深度: 0.45~0.70 mm 表面硬度: 78~82 HRA 心部硬度: 34~38 HRC																				
空心滚珠丝杠(φ37.8 mm×873~1027 mm, 材料: 18Cr2Ni4WA)	<p style="text-align: center;">(RJ1-105 井式炉)</p>	渗层深度: 0.8~1.1 mm 螺纹部分硬度: 58~62 HRC																				

(四) 碳氮共渗用钢及共渗后的热处理

(1) 碳氮共渗常用钢见表 3-20。由于共渗温度较低, 渗层较薄, 共渗用钢的碳含量可提高至含碳 0.5% (质量分数), 如 40Cr, 40CrNiMo, 40CrMnMoA 和 42CrMo 等。

(2) 碳氮共渗后的热处理见表 3-54。共渗后采用直接淬火的工艺简单, 应用普遍。

表 3-54 碳氮共渗后的热处理

热处理方式	淬 火 回 火 方 法	适 用 情 况
共渗后直接淬火方式	共渗后直接水淬+低温回火(160~200℃, 2~3 h)	1) 中低碳钢、低碳低合金钢 2) 液体碳氮共渗, 井式炉碳氮共渗
	共渗后直接油淬+低温回火(160~200℃, 2~3 h)	合金钢件, 各种炉型碳氮共渗
	共渗后直接气淬+低温回火	畸变小的工件
	共渗后直接分级淬火后空冷+低温回火(160~200℃, 2~3 h)	畸变小的合金钢件
	共渗后直接淬火+冷处理(-70~-80℃)+低温回火	含 Cr、Ni 较多的合金钢, 如 12CrNi3、20Cr2Ni4、18Cr2Ni4WA 等
共渗后空冷, 重新加热淬火方式	重新加热至 800~860℃ 淬火+低温回火(160~200℃, 2~3 h)	共渗后需机械加工的零件
	空冷后+620~650℃ 高温回火+800~820℃ 加热淬火+低温回火	共渗后需机械加工的零件(减少淬火残留奥氏体量, 代替冷处理)

(五) 碳氮共渗件的质量检验

碳氮共渗处理可使工件心部具有一定的强韧性的同时, 提高工件表层的强度和硬度, 特别是疲劳强度、耐磨性和抗蚀性比渗碳淬火更加好。碳氮共渗后的质量检验见表 3-55(变形除外)。其他检验要求请参见第八章。

表 3-55 碳氮共渗件的质量检验

检验项目	检测方法 & 一般要求		
外 观	1) 呈灰色, 不得有裂纹、氧化皮、碰伤、剥落的锈蚀 2) 用肉眼或放大镜检查, 必要时用磁粉或染色探伤		
表面和心部硬度	1) 表面硬度检验方法由共渗层深度确定 2) 表面硬度应达图样的技术要求, 一般为 56~63 HRC。对于齿轮, 齿面硬度不小于 57 HRC, 允许在齿顶或端面检查 3) 表面硬度偏差范围: 对重要件和一般件单件偏差分别为 3 HRC 和 4 HRC, 同一批件分别为 5 HRC 和 7 HRC; 在大约相距 120° 的齿上检测三处 4) 心部硬度: 图样无要求, 一般不检验, 对齿轮按行业标准检测 5) 齿轮心部硬度在轮齿中线与齿根圆相交处测定, 光轴为 3 倍共渗层深处测定 6) 硬度梯度的分布应平缓, 按 GB/T9450 用 HV 方法测试; 由于共渗表面层残留奥氏体较多而引起硬度降低, 允许超过 50 HV		
淬硬层深度 CHD	1) 在齿的节圆附近检查 2) 一般比渗碳的淬硬层深度减少 10%~20% 3) 淬硬层深度偏差见下表:		
	淬硬层深度(mm)	单 件	同一批件
	<0.5	0.10	0.20
	0.5~1.50	0.20	0.30
显微组织检验	心部铁素体含量, 心部硬度合格可不检查		



## (六) 碳氮共渗件的常见缺陷、产生原因及防止措施(表 3-56)

表 3-56 碳氮共渗件的常见缺陷产生原因及防止措施

缺陷名称	产生原因	防止措施
粗大碳氮化合物	1) 表层碳氮含量过高 2) 共渗温度过高, 表层出现密集的粗大条块状碳氮化合物 3) 共渗温度过低, 炉中碳势过高, 表层出现连续的网状碳氮化合物	1) 严控炉气碳势和氮势 2) 气体碳氮共渗初期严控氮的加入量
黑点	多发生在离表层 40 $\mu\text{m}$ 处的孔洞 1) 共渗初期炉气氮势过高 2) 渗层中氮含量过高 3) 共渗时间较长, 碳浓度增高, 发生氮化物分解 4) 脱氮过程, 原子氮变成分子氮而形成孔洞	1) 表面渗层中 $w_{\text{N}} \leq 0.4\%$ 2) 炉子密封, 防漏气 3) 氮气要干燥 4) 加速排气(甲醇裂解), 排气阶段氮不宜过多, 否则 $\text{NH}_3$ 和 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_2$ 发生化学反应生成水蒸气, 提高炉内氧势, 内氧化加剧。 $\text{N}_2$ 为 0.1% (体积分数) 时, 会形成托氏体网
表面黑带	出现在距表层 0~30 $\mu\text{m}$ 的范围内 1) 形成合金元素的氧化物、氮化物和碳化物等小颗粒 2) 奥氏体中合金元素贫化, 使淬透性降低, 形成托氏体、贝氏体组织	5) 适当提高淬火加热温度, 共渗后尽量不要空冷, 防止脱碳、脱氮 6) 共渗温度不宜低于 820 $^{\circ}\text{C}$ , 否则会使煤油分解不充分、排气速度慢、炉内氧化性气体多
黑色网	在黑带内侧一定区域内, 碳氮沿奥氏体晶界扩散, 在晶界形成 Mn、Ti 等元素的碳氮化合物, 使晶界附近奥氏体中合金元素降低, 淬透性降低, 形成托氏体	7) 出现黑色组织可以重新加热, 快速淬火, 加以消除 8) 含与氧亲和力大的 Cr、Mn、Ti 的钢在吸热式气氛中碳氮共渗会出现内氧化
过渡区黑带	过渡区中锰形成碳氮化合物后, 使奥氏体中 Mn、C、N 都降低, 淬透性降低, 出现托氏体(表面附近 Mn 少, 但 C、N 多, 淬透性仍较高)	重新加热淬火
表面形成壳状化合物	1) 共渗温度偏低 2) 供氮量高或在正常温度下共渗介质的碳氮浓度过高	1) 适当提高共渗温度 2) 后期应适当降低供氮量 3) 控制炉气碳、氮浓度
表面脱碳	共渗介质不足或炉罐漏气	调节渗剂的通入量及搞好各环节的密封

## 二、气体氮碳共渗

## (一) 气体氮碳共渗前的准备工作

准备工作除参照表 3-21、表 3-26 进行外, 还需做好以下几点, 见表 3-57。

表 3-57 气体氮碳共渗前的准备工作

工作名称	具体说明
工件准备	1) 细长件、薄壁件和精密件去应力处理, 温度一般应高于共渗温度 20 $^{\circ}\text{C}$ , 保持足够时间 2) 调质件、淬火回火件, 回火温度不低于共渗温度 3) 工件表面粗糙度 $Ra < 3.2 \mu\text{m}$ (试样与之相当) 4) 防渗部位常用镀锡 5~10 $\mu\text{m}$ 后, 加磷酸盐覆膜处理, 防止锡液流淌; 也可在表面镀 8~15 $\mu\text{m}$ 厚的铜层
设备准备	1) 选用炉型有井式炉、钟罩式炉、箱式周期式炉及连续炉等, 炉盖应具有良好的密封性能 2) 在处理温度范围内, 测温仪表指示温度总误差不超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 3) 共渗炉、裂化炉及供气系统等工作过程中不得漏气 4) 炉内设置良好气氛循环装置

(续表)

工作名称	具体说明
共渗剂准备	1) 共渗剂分两类: ① 含有氮碳原子的有机化合物, 如尿素、三乙醇胺、甲酰胺等, 它们可单独使用, 也可与其他有机化合物同时使用; ② 以 NH <sub>3</sub> 为主, 添加醇类裂解气、CO <sub>2</sub> 、吸热式气氛、放热式气氛等的任何一种气体 2) 符合 JB/T9209《化学热处理渗剂技术条件》规定, 其化学成分稳定, 含杂质少, 可参看表 3-58
装 炉	1) 工件妥当装夹在吊具、料筐中, 注意间距, 保证炉气畅通 2) 试样置于代表性部位, 每部位 1~2 件 3) 工件入炉后迅速排气, 一般在 10~30 min 内完成 4) 影响排气速度的因素有装炉量、渗剂种类、滴入量、排气口大小等, 一般应增加滴量、加大供气量、开足排气口阀门 5) 炉温到达后, 点燃废气 6) 工件在井式炉中的位置上端不应超过排气管, 下端应与进气管保持一定距离

表 3-58 气体氮碳共渗常用渗剂

工艺方法	渗剂成分(体积分数, %)	备 注
氨+吸热式可控气氛 (RX)	NH <sub>3</sub> 50%+RX50%	RX 气成分(体积分数): H <sub>2</sub> 32%~40%、CO 20%~24%、CO <sub>2</sub> 1%、N <sub>2</sub> 38%~43%。 废气中 HCN 很高, 可达 $6.2 \times 10^{-4}\%$ , 排气口点燃也不能达到排气标准
氨+放热式可控气氛 (NX)	NH <sub>3</sub> 50%~60% + NX 40%~50%	NX 气成分(体积分数): CO <sub>2</sub> ≤ 10%、CO < 5% (一般 1.8% 左右)、H <sub>2</sub> < 1%、N <sub>2</sub> > 85%。 废气中 HCN 甚少, 小于 $(10 \sim 12) \times 10^{-4}\%$ , 成本较低
尿 素	(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CO 100%	$(NH_2)_2CO \xrightarrow{>500^\circ C} CO + 2H_2 + 2[N]$ 通过螺杆式送粉器将尿素加入炉罐中, 尿素在进入炉膛入口处往往容易堵塞。为此, 常改用弹力机构将球粒状尿素弹入炉内。尿素要预先经 80℃ 烘干; 用甲醇排气
甲酰胺	HCONH <sub>2</sub> 100%	$4HCONH_2 \xrightarrow{400 \sim 700^\circ C} 4H_2 + 2CO + 2H_2O + 4[N] + 2[C]$ 采用甲酰胺优于三乙醇胺, 用甲醇排气
甲酰胺+尿素	甲酰胺 70%+尿素 30%	低合金钢: 570℃; Cr12MoV: 540℃; 3Cr2W8V: 570~620℃
三乙醇胺+乙醇	三乙醇胺 50%+乙醇 50%	W18Cr4V: 555~565℃
氨+裂化气	NH <sub>3</sub> 50%+裂化气 50%	裂化气: 由乙醇(酒精)与水按克分子量比 1:1 配制的溶液经 900~950℃ 裂解而成。分解率 35%~40% (570℃)。在炉膛尺寸为 φ600 mm × 2400 mm 时, 加入量 1.8~2.4 m <sup>3</sup> /h
氨+乙醇	氨 85%+乙醇 15%	乙醇与氨的比例可在较宽的范围内变动, 在炉膛尺寸为 φ600 mm × 750 mm 时的加入量: NH <sub>3</sub> 0.70~0.75 m <sup>3</sup> /h, 酒精 2 mL/min (排气、保温)
氨+氧	氨 100%+氧(0.2~1)%	在炉膛尺寸 φ450 mm × 650 mm 加入量: 在保温阶段为 0.3 m <sup>3</sup> /h; 排气阶段为 0.4 m <sup>3</sup> /h
氨+二氧化碳	氨 100%+CO <sub>2</sub> 5%	在炉膛尺寸 φ600 mm × 2500 mm 加入量: 1~1.2 m <sup>3</sup> /h (保温、排气), 氨分解率 50%~60%

## (二) 气体氮碳共渗工艺(表 3-59)

表 3-59 气体氮碳共渗工艺

工序及处理参数	具 体 说 明						
共渗温度	1) 一般为 540~580℃,最佳共渗在 560~580℃,略高于 Fe-N-C 三元共析温度 565℃ 2) 特殊要求钢件如高速钢或高铬工具钢在 510~550℃共渗 3) 特殊情况可在 650~680℃共渗						
共渗时间	1) 共渗深度与时间呈抛物线关系 2) 一般共渗时间为 2~4 h,超过 4 h 后,致密化合物层不再增厚,但疏松区加宽,渗层硬度降低 3) 高速钢刀具共渗时间 1~1.5 h 4) 保温时间对共渗深度与表面硬度影响见下表(560~580℃共渗):						
	钢 号	保温 2 h			保温 4 h		
		共渗层特性					
		硬度 HV	化合物深度 (μm)	扩散层深度 (mm)	硬度 HV	化合物深度 (μm)	扩散层深度 (mm)
	20	480	10	0.55	500	18	0.80
	45	550	13	0.40	600	20	0.45
	T10	620	11	0.35	680	15	0.35
15CrMo	600	8	0.30	650	12	0.45	
40CrMo	750	8	0.35	860	12	0.45	
炉气调节和渗剂通入操作	1) 工件装入后立即送入渗剂排气(0.5~1 h),最佳排气时间小于 0.5 h,建议用乙醇。到达共渗温度后在出气口点燃,如不易点燃,应及时消除管道堵塞物和加大渗剂通入量 2) 炉温再次到达时开始计算保温时间,严格控制渗剂加入量 3) 注意炉压和火苗颜色,以判断炉内工作状态 4) 检查 NH <sub>3</sub> 分解率和渗剂滴量,一般炉温正常时,流量增加,NH <sub>3</sub> 分解率下降;反之,则提高 5) 长期使用的炉罐如发生 NH <sub>3</sub> 分解率高时,可在停炉后进行 800~860℃空烧 2~4 h 的脱氮处理 6) 共渗炉内存在氢氰酸(HCN),为此,操作时尽量减少乙醇等滴入量以减少炉气中的 HCN 量 7) 工件出炉升起炉盖时,需点燃以烧掉炉内的 HCN 和 NH <sub>3</sub> 8) 工作环境应符合环保要求(HCN<0.3 mg/m <sup>3</sup> ,NH <sub>3</sub> <30 mg/m <sup>3</sup> )						
渗后冷却	1) 共渗后工件一般采用油冷,以提高工件疲劳强度 2) 要求工件表面具有银灰色外观时,可在通 NH <sub>3</sub> 或裂化气保护下提起炉罐冷至 200℃以下出炉						

## (三) 气体氮碳共渗件的质量检验(表 3-60)(其余参见第八章)

表 3-60 气体氮碳共渗件的质量检验

检验项目	检 验 具 体 内 容
外观	1) 用肉眼检查表面,不得有氧化皮、碰伤、剥落、电弧烧伤、残盐存留等缺陷 2) 在渗层硬度、深度及疏松等各项要求均合格前提下,共渗件表面如有氧化色,允许作合格处理 3) 表层不允许有肉眼可见的疏松
表面硬度与齿轮的齿面硬度	1) 指标应达技术图样要求,重要件逐件检验,一般件抽验 10%~20% 2) 无法用硬度计检查的齿轮,一般以随炉试样测定为准 3) 对解剖的齿轮或随炉齿形试块,最好在轮齿齿宽中部法截面上,在半齿高处,沿垂直于齿面方向测距表面 0.05 mm 处的硬度

(续表)

检验项目	检验具体内容
渗层深度与轮齿中心硬度	1) 渗层深度测定以硬度为主,金相法为辅 2) 批量生产齿轮,当随炉试样合格时应定期抽验,当随炉试样不合格,则该批至少按上述方法抽验 1 件;对单件重要齿轮,一般以随炉试样测量为准 3) 渗层深度均匀度为技术条件要求中值的±15% 4) 随炉试样磨制后,在大于渗层两倍处测定三点硬度,取平均值作为心部硬度,结果应达技术要求
化合物层疏松	按 GB/T11354 分为 5 级: 1~3 级合格; 4~5 级,疏松严重,不合格
脆性	化合物层含氮量较低,为 4.5%~6%(气体渗氮含氮量为 7%~8%), $\omega_{C}$ 0.8%~2.5%,增加渗层的韧性
渗层中氮化物形态	按 GB/T11354 评定,1~3 级合格
变形	对精度要求高的齿轮,抽查 1~3 件,用相应量具检查,应符合技术条件要求,超差的可予校正和去应力处理
防渗效果	应保持原金属色,用硬度计或高硬度锉刀检查,不影响切削加工

常用材料气体氮碳共渗后渗层厚度和表面硬度参考值见表 3-61。

表 3-61 常用材料气体氮碳共渗后渗层厚度和表面硬度参考值

材 料	表面硬度		渗层厚度(mm)	
	HV0.1	HRC(换算值)	化合物层	扩散层
45	550~700	52~60	0.007~0.015	0.15~0.30
T10	500~650	49~58	0.003~0.010	0.10~0.20
20Cr, 40Cr	650~800	57~64	0.005~0.012	0.10~0.25
35CrMo, 50CrMn	650~800	57~64	0.005~0.012	0.10~0.20
38CrMoAlA	900~1 100	>67	0.005~0.012	0.10~0.20
3Cr2W8V	750~850	62~65	0.003~0.010	0.10~0.18
Cr12MoV	750~850	62~65	0.002~0.007	0.05~0.10
W18Cr4V(淬回火后)	950~1 200	>68	0.002~0.007	0.05~0.10
QT600-3, 灰铸铁	550~750	52~62	0.001~0.005	0.04~0.06

(四) 应用实例(表 3-62)

表 3-62 气体氮碳共渗应用实例

设备及技术条件	工 艺 曲 线
设备: RQ3-90-9D 材料: QT600-3 曲轴 技术要求: 化合物层 $\leq 0.01$ mm 氮碳共渗层深: $> 0.10$ mm	<p>                         温度(°C) vs 时间(h) 工艺曲线图。                     </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>温度: 570±10 °C</li> <li>排气阶段: 0.5~1 h, <math>NH_3</math> 700~750 L/h, <math>C_2H_5OH</math> 2 mL/min</li> <li>保温阶段: 2~4 h, <math>NH_3</math> 700~750 L/h, <math>C_2H_5OH</math> 2 mL/min</li> <li>冷却: 油冷</li> </ul>

(续表)

设备及技术条件	工艺曲线
设备: RQ3-25-9D 材料: 中碳钢及中碳合金结构钢 技术要求: 化合物层 $\leq 0.025$ mm 扩散层深: $\leq 0.4$ mm 硬度: 789~863 HV	<p> <math>N_2</math>(m<sup>3</sup>/h) 0.4  <math>NH_3</math>(m<sup>3</sup>/h) 0.4~0.5  <math>CH_3OH</math>(体积分数, %) 0.6~1.0            时间(h) 0.7 3~4         </p>
设备: RQ3-25-9D 材料: 3Cr2W8V 技术要求: 化合物层 $\leq 0.003 \sim 0.01$ mm, 氮碳共渗层 $0.10 \sim 0.18$ mm 硬度: 850 HV	<p> <math>CH_3OH</math>(mL/min) 3~4 0.84  <math>NH_3</math>(L/h) 300 300            时间(h) 0.5 3.5         </p>

## (五) 气体氮碳共渗件的常见缺陷、产生原因及防止措施(表 3-63)

表 3-63 气体氮碳共渗件常见缺陷、产生原因及防止措施

缺陷特征	产生原因	防止措施(对策)
渗层深度不够	1) 温度低,保温时间短,介质浓度低或供气量少 2) 渗件装炉重叠或与炉底、炉壁接触	按常规工艺,重新处理
渗层硬度不均匀 渗层厚度不均匀	1) 渗件未清洗干净,装炉过多,进气、出气口位置不合理或堵塞,气氛温度不均匀 2) 防渗层覆盖不均匀或镀锡层滴流	1) 渗件应清洗干净,合理装炉 2) 改善气氛和温度均匀性 3) 严格按工艺操作
渗层疏松	1) 氮分解率低,渗剂加入量多 2) 温度高、时间长	1) 调整工艺参数 2) 留磨量大的渗件,可磨去疏松层后使用
化合物层脆	氮气分解率低,氮气含水量过多	合理供气烘干或更换干燥剂
表面硬度低	1) 温度过高,时间过长,造成表面疏松 2) 时间短,氮气分解率偏低 3) 渗剂供给不足 4) 表面未清洗干净	1) 去除表面污迹及锈斑 2) 严格工艺纪律
表面呈蓝色或金黄色	1) 炉膛密封性差,提罐冷却时供气不足 2) 出炉温度过高,气氛含水量高	1) 提罐冷却时适当加大供气量 2) 烘干或更换干燥剂
工件表面颜色不均匀	1) 工件表面有锈斑、氧化皮、严重油污 2) 未清洗干净或局部有防渗剂覆盖	1) 严格清洗工件,防渗涂覆部位要准确 2) 不得沾污欲渗表面 3) 镀锡层不得过厚
零件畸变量超差	1) 处理前未消除应力 2) 温度不均匀或温度过高 3) 吊挂不合理	1) 渗前去应力 2) 炉温保持均匀 3) 合理吊挂 4) 对畸变要求严格件可用冷炉进料

### 三、液体氮碳共渗

#### (一) 液体氮碳共渗前的准备工作(表 3-64)

表 3-64 液体氮碳共渗前的准备工作

工作名称	具 体 说 明
工件准备	参照表 3-57;干燥工件;工件在(350±20)℃预热 30 min
工装准备	入炉前充分干燥;工件装夹在工装夹具上;在(350±20)℃预热 30 min
设备准备	熔盐氮碳共渗常采用外热式坩埚浴炉,坩埚用不锈钢耐热钢制造;通风抽气设施完好;保证盐浴温度均匀,盐浴有效加热区内温度波动范围不大于±10℃;浴炉设置炉盖和泄盐孔;预热炉、氧化浴炉和油炉安全正常运行;热电偶校核及正常使用;电气控制设备正常运行
劳防安全准备	按 GB/T15735 要求设置中和、消除有毒废液处理装置;穿戴合理的劳防用品;工作场地、环境达有关标准;保管好废渣;废水符合标准才可排放;因有刺激性的 NH <sub>3</sub> 析出,气体应抽送到离地面 5 m 以上的排风口排放;最好安置处理废气废水的设备装置
共渗剂准备	共渗介质主要成分是碱金属氰酸盐,原料虽无毒,但应妥善保管、领用,按制度执行;工作盐浴在工作过程中或多或少地会产生 CN <sup>-</sup> ,CN <sup>-</sup> 是有毒成分,力求选用低氰盐浴或无氰盐浴;对低氰盐浴,在后续工序应使微量 CN <sup>-</sup> 氧化成无毒的 CO <sub>2</sub> 以实现无污染作业;基盐和再生剂烘干后才可入炉
装 炉	清洗干净工件装吊在工装夹具上,在预热炉中预热一定时间后入共渗炉处理;易畸变工件应合理装挂;试样合理放置于代表性部位;工件间隙均匀

#### (二) 液体氮碳共渗工艺

熔盐氮碳共渗工艺见表 3-65,表 3-66 为工艺操作注意事项。

表 3-65 液体氮碳共渗工艺

工艺参数	具 体 说 明															
共渗温度	1) 多数钢种的共渗温度为 540~580℃,最佳为 560~580℃ 2) 共渗温度一般不高于 590℃,否则 CNO <sup>-</sup> 浓度下降过大,使盐浴活性降低 3) 奥氏体氮碳共渗温度高于 590℃															
共渗时间	共渗时间一般为 0.5~4 h															
共渗后冷却	1) 可以在空气、油、水或 AB-1 盐浴中冷却 2) 各种冷却方式的特点及影响示见下表:															
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>冷却方式</th> <th>主 要 特 点</th> <th>对共渗层性能影响</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>空气冷却</td> <td>冷速小,在沸水中洗净盐渍需 10~30 min</td> <td>工件畸变小些,疲劳强度略有提高</td> </tr> <tr> <td>油 冷</td> <td>冷速大于空冷,在沸水中洗净盐渍需 30~60 min</td> <td>工件畸变小些,疲劳强度略有提高</td> </tr> <tr> <td>水 冷</td> <td>冷速大,在沸水中洗净盐渍需 3~10 min</td> <td>工件畸变大些,疲劳强度高,工件表面形态好</td> </tr> <tr> <td>AB-1 盐浴中冷却</td> <td>冷速较大,在沸水中洗净盐渍需 5~15 min,使 CN<sup>-</sup>、CNO<sup>-</sup> 很快分解,可无污染排放废水</td> <td>工件畸变小,疲劳强度提高低于水冷,耐腐蚀性大大提高</td> </tr> </tbody> </table>	冷却方式	主 要 特 点	对共渗层性能影响	空气冷却	冷速小,在沸水中洗净盐渍需 10~30 min	工件畸变小些,疲劳强度略有提高	油 冷	冷速大于空冷,在沸水中洗净盐渍需 30~60 min	工件畸变小些,疲劳强度略有提高	水 冷	冷速大,在沸水中洗净盐渍需 3~10 min	工件畸变大些,疲劳强度高,工件表面形态好	AB-1 盐浴中冷却	冷速较大,在沸水中洗净盐渍需 5~15 min,使 CN <sup>-</sup> 、CNO <sup>-</sup> 很快分解,可无污染排放废水	工件畸变小,疲劳强度提高低于水冷,耐腐蚀性大大提高
	冷却方式	主 要 特 点	对共渗层性能影响													
	空气冷却	冷速小,在沸水中洗净盐渍需 10~30 min	工件畸变小些,疲劳强度略有提高													
	油 冷	冷速大于空冷,在沸水中洗净盐渍需 30~60 min	工件畸变小些,疲劳强度略有提高													
	水 冷	冷速大,在沸水中洗净盐渍需 3~10 min	工件畸变大些,疲劳强度高,工件表面形态好													
AB-1 盐浴中冷却	冷速较大,在沸水中洗净盐渍需 5~15 min,使 CN <sup>-</sup> 、CNO <sup>-</sup> 很快分解,可无污染排放废水	工件畸变小,疲劳强度提高低于水冷,耐腐蚀性大大提高														
	3) AB-1 浴冷却后经抛光再次在 AB-1 中氧化的工艺称 QPQ 工艺															

表 3-66 液体氮碳共渗操作的注意事项

序号	注 意 事 项 具 体 内 容
1	共渗炉中取出的工件,应置于坩埚上方沥盐 1~3 min 后再缓慢转入氧化盐浴,以减少共渗盐消耗和降低氧化浴中的反应激烈程度
2	共渗后在空气、油或水中冷却的工件,应在废水中洗净盐渍
3	AB-1 等氧化盐浴具有速效性和稳定性(去除 CN <sup>-</sup> 和 CNO <sup>-</sup> 的作用),对新配氧化盐浴因活性高,氧化温度可取下限(只要超过 300℃ 即可)
4	<p>长期使用共渗盐,氰酸根分解和氧化(反应(1)和(2)),产生[N]、[C]渗入工件表面,完成氮碳共渗[反应(3)和(4)]。同时 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 增多:</p> $4MCNO \rightleftharpoons M_2CO_3 + 2[N] + 2MCN + CO \quad (1)$ $2MCNO + O_2 \rightleftharpoons M_2CO_3 + 2[N] + CO \quad (2)$ $XFe + [N] \rightleftharpoons Fe_xN \quad (3)$ $3Fe + 2CO \rightleftharpoons Fe_3C + CO_2 \quad (4)$ <p>导致 CNO<sup>-</sup> 低于要求下限 34%~38% 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 过高,熔盐即告陈化,应添加 REG-1 等再生盐,经反应,使 CNO<sup>-</sup> 增加,熔盐恢复活性</p>
5	<p>清洗粘附有共渗盐浴的工件的废水以及从共渗盐浴中捞出的盐渣,应添加能消除 CN<sup>-</sup> 的化学药剂处理,使 CN<sup>-</sup> 低于 0.5 mg/L 方能排放。处理的方法一般为:</p> <p>1) 用含次氯酸钠(NaClO)的制碱废液消除 CN<sup>-</sup>。按消除 1 g CN<sup>-</sup> 需用 10 g NaClO 计算废碱用量(如按有效氯浓度标准计算,[Cl]为 3%(质量分数)时,废碱液含 NaClO 为 74 g/L,余类推)。</p> <p>2) 用 FeSO<sub>4</sub> 及漂白粉消除 CN<sup>-</sup>。每消除 1g CN<sup>-</sup>,应加 10 g FeSO<sub>4</sub>, 3 g Ca(ClO)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O(工业用漂白粉)。加入后搅拌 3~5 min 和静置 5~10 min 后即可排放</p>
6	共渗盐浴中捞出的渣含 CN <sup>-</sup> 低于 0.1%(质量分数)。每千克渣加入 20 kg 水,煮沸后加 10 g FeSO <sub>4</sub> , 3 g Ca(ClO) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O 或加入相当于 10 g NaClO 的制 NaOH 的废液,搅拌 3~5 min 和静置 5~10 min 后即可排放
7	共渗后工件在氧化浴中分级冷却后的清洗废水无需处理即可直接排放
8	共渗盐浴中捞出的渣也可储存后一起交有处理资格的工厂统一处理

典型的熔盐氮碳共渗的熔盐成分见表 3-67。

表 3-67 典型的液体氮碳共渗的熔盐成分(包括硫氮碳共渗)

序号	公司盐浴配方及商品名称	基盐、再生盐状况	主要特点及应用情况
1	NS-2 方法(国外老类型 Tufftride 方法)	<p>基盐: 85%NS-1(40%KCNO+60%NaCN) + 15%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(原料剧毒)</p> <p>再生盐: NS-2(75%NaCN+25%KCN)</p> <p>工作时成分: (KCNO+NaCNO)占 42%~48%, (KCN+NaCN)约 50%, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 2%~8%</p>	Na: K 约(60~80):(40~20); 不断通入空气, CN <sup>-</sup> 含量高达 20%~25%; 新配盐浴需要“时效”; 成分和处理效果较稳定,但毒性高,需有环保处理设施
2	TF1 方法(国外新型 Tufftride 方法) QPQ 处理(氮碳共渗)	<p>基盐: TF1, 利用有机物与无机物原料配制成 MCNO 与 M<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 的混合盐, CNO<sup>-</sup> 含量为 44%~48%</p> <p>再生盐: REG-1 有机化合物, 用(C<sub>6</sub>N<sub>9</sub>H<sub>5</sub>)<sub>n</sub> 表示, 使 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 转化为 CNO<sup>-</sup> 而活化, 盐浴原料均无毒, 使用中有 CN<sup>-</sup> 产生</p>	Na: K 约(10~30):(90~70); 不断通入空气或 CO <sub>2</sub> CNO <sup>-</sup> 控制在 32%~38%, CN <sup>-</sup> 小于 3%, 共渗后在 AB-1 浴中冷却使 CN <sup>-</sup> 、CNO <sup>-</sup> 分解, 具有环保特点
3	QPQ 复合热处理(国内研发)(氮碳共渗)	<p>基盐: 不含 CN<sup>-</sup>, 熔化后 CNO<sup>-</sup> 大于 35%, 含特殊氧化剂, 降低 CN<sup>-</sup> 和使 CNO<sup>-</sup> 稳定</p> <p>调整盐: 不含氰化物, 加入共渗浴使 CNO<sup>-</sup> 回升并稳定在一定范围; 原料均无毒, 使用中有 CN<sup>-</sup> 产生</p>	Na: K 约 1:1; CN <sup>-</sup> < 0.15%; 不通入空气 共渗后在氧化浴中冷却使 CN <sup>-</sup> 、CNO <sup>-</sup> 分解, 具有环保特点

(续表)

序号	公司盐浴配方及商品名称	基盐、再生盐状况	主要特点及应用情况
4	LT 和 LTC 化学热处理(国内研发) (氮碳共渗)	基盐: 用 Na、K 和 Li 的碳酸盐与尿素合成, J2B 启动用盐, 含 $CNO^-$ 37.5%+2%; J2A 为补加盐, 含 $CNO^-$ 45%+2% 再生盐: Z-1、Z-2 为有机缩合物, 可将 $CO_3^{2-}$ 转变成 $CNO^-$ 原料均无毒, 使用中有 $CN^-$ 产生	$M^+$ ( $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Li^+$ ) 有允许范围; $CNO^-$ 在 40%~42% 范围内强化效果稳定, 不断通入空气, 使用过程中 $CN^-$ 低于 3% 共渗后在国产 Y-1 氧化浴中冷却, 使 $CN^-$ 、 $CNO^-$ 分解, 具有环保特点
5	Sursulf Arcor 化学热处理(国外研发) (磷氮碳共渗)	基盐: 由钾、钠、锂的氰酸盐与碳酸盐及少量 $K_2S$ 组成(CR4 盐) 再生盐: CR2 盐, 调整共渗盐浴成分 原料均无毒, 使用中有 $CN^-$ 产生	$Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Li^+$ 有限制范围 $CN^-$ 小于 0.8% (小于 1% 为无污染作业); 不断通入空气 共渗后在氧化浴中冷却, 称为 Oxnit 处理方法; 使 $CN^-$ 、 $CNO^-$ 分解, 具有环保特点
6	LT 和 LTC 化学热处理(国内研发) (硫氮碳共渗)	基盐: 钾、钠、锂碳酸盐、尿素与硫化物(一般用 $K_2S$ ) 通过化工合成, 供货状态下 $CNO^-$ 为 40%~42%; $CO_3^{2-}$ 为 14%~17%; S 为 $(10\sim 20)\times 10^{-4}\%$ , $CN^- \leq 0.1\%$ 再生盐: Z-1, 加入活性不足的熔盐中, 可使 $CNO^-$ 量提高, 同时降低 $CO_3^{2-}$ 量, 使 $CNO^-$ 稳定在最佳值 $\pm(1\%\sim 2\%)$ 内 原料均无毒, 使用中有 $CN^-$ 产生	$M^+$ ( $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Li^+$ ) 之和为 42%~45%; $CN^-$ 控制在 0.1%~0.8%; 不断通入空气 共渗后在氧化浴 Y-1 中冷却, 使 $CN^-$ 、 $CNO^-$ 分解, 具有环保特点 (J1B、J1A 分别为启动用盐和补加盐, $CNO^-$ 分别为 36%~40% 和 40%~44%)

(三) 液体氮碳共渗件的质量检验

液体氮碳共渗件的质量检验见表 3-60。

(四) 氮碳共渗用钢及共渗后的性能

1. 氮碳共渗用钢

一般钢铁零件均可采用氮碳共渗处理, 常用的钢种和铸铁牌号见表 3-68。

表 3-68 氮碳共渗处理常用钢种和铸铁牌号

材料类别	材料牌号
普通碳素结构钢(GB/T700)	Q195、Q215、Q235
优质碳素结构钢(GB/T699)	08、10、15、20、25、35、40、45、15Mn、20Mn、25Mn
合金结构钢(GB/T3077)	15Cr、20Cr、40Cr、15CrMn、20CrMn、20CrMnSi、25CrMnSi、30CrMnSi、35SiMn、42SiMn、15CrMnMo、20CrMnMo、40CrMnMo、20CrMo、15CrMo、35CrMo、40CrMo、20CrMnTi、30CrMnTi、40CrNi、12Cr2Ni4A、12CrNi3A、20CrNi3A、20Cr2Ni4A、30CrNi3A、18Cr2Ni4WA、25Cr2Ni4WA、38CrMoAl、25Cr2MoV
合金工具钢(GB/T1299)	Cr12、Cr12MoV、3Cr2W8V
铸铁	HT200、HT250(GB/T9439)、QT500-7、QT600-3、QT(700-2)(GB/T1348)

2. 氮碳共渗层深度与表面硬度

经气体氮碳共渗和液体氮碳共渗处理的渗层深度和表面硬度见表 3-61 和表 3-69。



表 3-69 液体氮碳共渗层的深度与表面(层)显微硬度

钢 号	前处理工艺	化合物层深( $\mu\text{m}$ )	主扩散层深(mm)	表层显微硬度
20	正 火	12~18	0.30~0.45	450~500 HV0.1
45	调 质	10~17	0.30~0.46	500~550 HV0.1
38CrMoAlA	调 质	8~14	0.15~0.25	950~1 100 HV0.1
30Cr13	调 质	8~12	0.08~0.15	900~1 100 HV0.1
1Cr18Ni9Ti	固溶处理	8~14	0.06~0.10	1 049 HV0.05
45Cr14Ni14W2Mo	固溶处理	10	0.06	770 HV1
20CrMnTi	调 质	8~12	0.10~0.20	600~620 HV0.05
3Cr2W8V	调 质	6~10	0.10~0.15	850~1 000 HV0.2
W18Cr4V	淬火+二次回火	2	0.025~0.040	1 000~1 150 HV0.2
HT200	退 火	10~15	0.18~0.25	600~650 HV0.20

注:表中 45Cr14Ni14W2Mo 处理 2 h, W18Cr4V 在  $550^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  共渗 20~90 min, 其他各种钢和铸铁皆在  $565^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  共渗 1.5~2 h。

### (五) 液体氮碳共渗件的常见缺陷、产生原因及防止措施

液体氮碳共渗件常见缺陷、产生原因及防止措施见表 3-70。

表 3-70 液体氮碳共渗件的常见缺陷、产生原因及防止措施

缺陷特征	产生原因	防止措施
工件化合物层极薄,扩散层较厚	CNO <sup>-</sup> 含量低;温度偏低;处理时间短	加 Z-1 或 REG-1;校准温度,酌情提高温度;适当延长处理时间
炉中氰酸根(CNO <sup>-</sup> )下降过快	温度过高或发生超温事故;未及时捞渣	增加超温报警装置,适当降温;及时捞渣
氰根(CN <sup>-</sup> )高	TF-1 中 CN 质量分数 3%, J-1 浴中 CN <sup>-</sup> 质量分数大于 2%;未通空气或通空气量太少	增大在盐浴中通空气量
渗层表面疏松严重,甚至起皮	CNO <sup>-</sup> 含量太高	空载陈化,使 CNO <sup>-</sup> 质量分数 $\leq 38\%$
工件上有花斑	入炉前工件上有油渍或锈斑;熔盐中液多;工件接触紧密	工件去锈、除油;熔盐中捞渣;工件间隙大于 0.5 mm
工件上有锈蚀	共渗件油冷,残盐未洗净;盲孔、狭缝处有盐渍	延长开水煮洗时间,采用 Y-1 或 AB-1 氧化浴冷却
调整成分时氨臭	有 NH <sub>3</sub> 、CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> O 逸出	启动抽风装置

## 第五节 激光热处理

激光不同于普通光源发射的光,它具有单色性好;相干性好;传播方向性好;强度高的特点。为此,激光束可应用光学系统透镜聚焦获得很小的光斑,并有很高的激光功率密度,可用于激光材料加工上。激光材料加工始于 1966 年在钻石拉丝模具上的激光钻孔。在 1971 年世界上出现第一台商用 1 kW CO<sub>2</sub> 激光器后,激光材料的加工和表面改性获得迅速的实用性发展。

### 一、激光发生器

激光材料加工设备主要由激光发生器(简称激光器)、功率测试控制系统、导光聚焦系统、加工机械、冷却系统及数控系统和软件编程系统等组成,见图 3-29。

激光来自激光发生器。由具有亚稳态能级结构的物质(或称激光工作物质),在激光器的光学谐振腔内受外界能量的激发(或称泵浦),形成工作物质的粒子数反转(或称集居数反转),在工作物质粒子由亚稳态向低能级跃迁过程中就会产生激光。

#### 1. 材料加工上的激光器

激光材料加工上常采用气体激光器和固体激光器两类,其激光光束的基本特征见表 3-71。

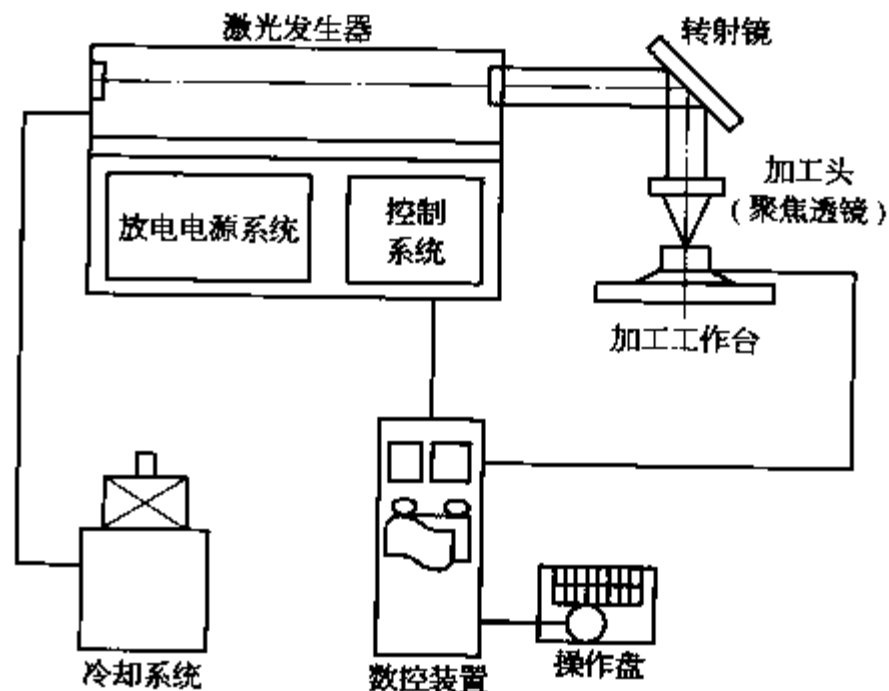


图 3-29 激光材料加工设备框图

表 3-71 用于材料加工的激光光束的基本特征

类别	激光名称	波长	光子能量	能量范围	激活介质	工作方式
气体激光器	CO <sub>2</sub> 激光	10.6 μm	0.117 eV	1~10 <sup>5</sup> W	CO <sub>2</sub>	连续、脉冲
	XeCl 激光	308 nm	4.03 eV	1~10 <sup>2</sup> W	XeCl	脉冲
	XeF 激光	351 nm	3.53 eV	1~10 <sup>2</sup> W	XeF	脉冲
	ArF 激光	193 nm	6.42 eV	1~10 <sup>2</sup> W	ArF	脉冲
	KrF 激光	248 nm	5.00 eV	1~10 <sup>2</sup> W	KrF	脉冲
固体激光器	YAG 激光	1.06 μm	1.17 eV	1~10 <sup>3</sup> W	Nd <sup>3+</sup> : YAG	连续、脉冲

1) 准分子激光器 准分子是一种在激发态结合为分子,在基态解离为原子的不稳定缔合物。商用准分子激光器一般采用快速放电泵浦实现脉冲激励。如以 KrF 激光器为例,在放电过程中,被电场加速的自由电子与 Kr 原子碰撞产生大量受激的 Kr<sup>+</sup>,它与卤素分子碰撞形成 KrF<sup>\*</sup> 准分子。相应过程可表示为:

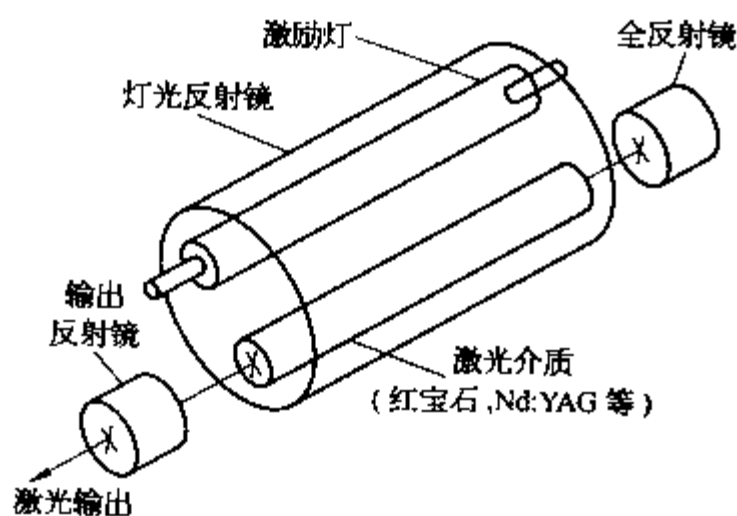
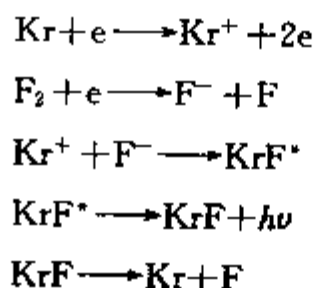


图 3-30 闪光灯激励的 Nd:YAG 固体激光器示意图



方程式中的  $h\nu$  是振荡频率为  $\nu$  的准分子激光( $h$  为普朗克常数),设计和改进放电泵浦电路的开关和激励,可获得数千赫兹的重复激发。

2) 固体激光器 固体激光器的工作物质是在固体基质材料(晶体或玻璃,如钇铝石榴石 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 为立方晶格晶体 YAG)中,掺杂少量可产生激光的激活离子(如 Nd<sup>3+</sup>、Cr<sup>3+</sup>、Ti<sup>3+</sup> 等)。YAG 中加入 1.3%~1.5% Nd<sup>3+</sup> (表示为 Nd:YAG)。如图 3-30 所示,圆柱形材料受到

泵浦光源(如闪光灯、半导体光源等)照射产生激励,形成如 Nd<sup>3+</sup> 的粒子数反转(图 3-31)。当 Nd<sup>3+</sup> 等粒子从亚稳定能级 2 向低能级 1 跃迁则发射 1.065 μm 的激光。它可以连续或脉冲工作。

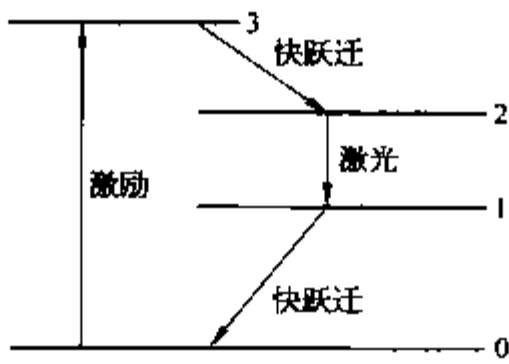


图 3-31  $\text{Nd}^{3+}$  在 YAG 晶体中的能级图  
(3,2,1,0 表示高能级、亚稳能级、低能级和基态)

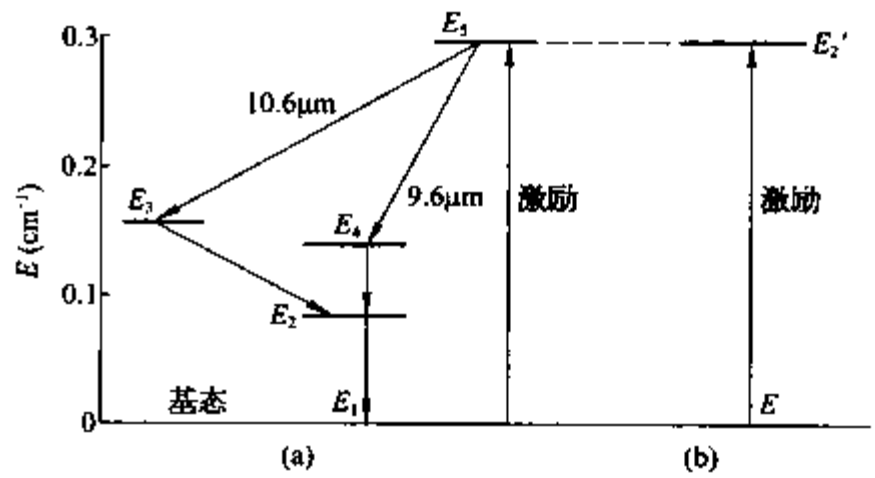


图 3-32  $\text{CO}_2$  分子和  $\text{N}_2$  分子的振动能级  
(a)  $\text{CO}_2$ ; (b)  $\text{N}_2$

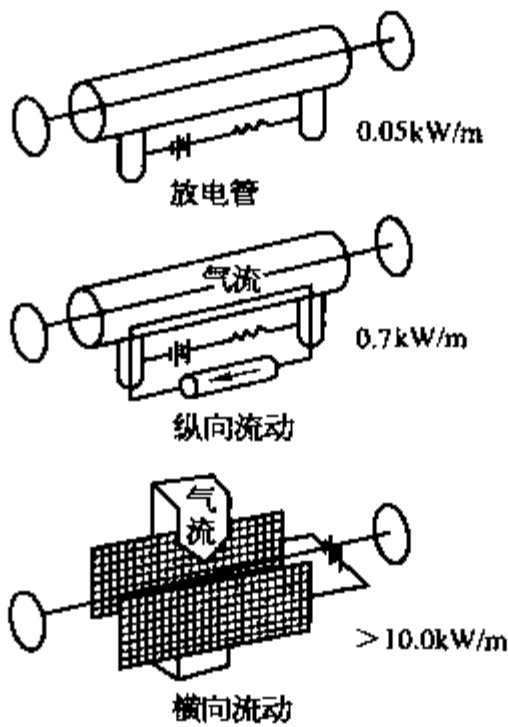


图 3-33  $\text{CO}_2$  激光器的三种不同结构形式示意图

3)  $\text{CO}_2$  激光器 它是一种依靠在光学谐振腔内发生辉光放电激励的分子激光器,基于  $\text{CO}_2$  分子振动能级之间的跃迁产生激光。 $\text{CO}_2$  激光器的工作气体为  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  和  $\text{He}$  的混合物。 $\text{CO}_2$  分子具有三个固有振动频率,对应着  $\text{CO}_2$  分子对称、弯曲和非对称三种振动方式,相应能级为  $E_3$ 、 $E_4$ 、 $E_5$ (图 3-32)。在辉光放电时, $\text{CO}_2$  分子受激跃迁至  $E_5$  能级,同时  $\text{N}_2$  分子受激跃迁至  $E_2'$  能级, $E_2'$  和  $E_5$  能级近于重合, $\text{N}_2$  和  $\text{CO}_2$  发生受激共振转移使  $\text{CO}_2$  在  $E_5$  上的反转粒子数迅速增加。 $\text{CO}_2$  由  $E_5$  向  $E_3$  和  $E_4$  能级跃迁分别发射  $10.6 \mu\text{m}$  和  $9.6 \mu\text{m}$  的激光,以前者为主。 $\text{CO}_2$  激光器的三种不同结构形式见图 3-33。

高斯或准高斯能量分布的轴向慢速流动  $\text{CO}_2$  激光器功率可达  $1.5 \text{ kW}$ ,轴向快速(接近声速)流动的激光器功率可达  $5 \text{ kW}$ ,横向流动  $\text{CO}_2$  激光器功率可达  $20 \text{ kW}$  以上。最近功率  $100 \text{ kW}$  的激光设备已用于钢铁制造生产线上。

$\text{CO}_2$  激光器一般分为七类,见表 3-72。

表 3-72  $\text{CO}_2$  激光器类别

序号	名称	说明
1	纵向慢流 $\text{CO}_2$ 激光器	输出功率约为 $50 \sim 60 \text{ W/m}$
2	封离型 $\text{CO}_2$ 激光器	输出功率同上,寿命超过数千至 1 万小时
3	纵向快流 $\text{CO}_2$ 激光器	$1 \sim 3 \text{ kW}$ 激光器广泛应用激光加工,光束质量好
4	横向流动 $\text{CO}_2$ 激光器	总输出功率达 $20 \text{ kW}$
5	横向激励大气压 $\text{CO}_2$ 激光器	总能量和峰值功率可达 $10 \text{ kJ}$ 和 $20 \text{ TW}$
6	气动 $\text{CO}_2$ 激光器	输出功率可达 $80 \text{ kW}$
7	波导 $\text{CO}_2$ 激光器	适于制作小于 $30 \text{ W}$ 的小型封离激光器,输出功率约 $50 \text{ W/m}$

## 2. 横流 $\text{CO}_2$ 激光器

激光热处理着重应用横向流动  $\text{CO}_2$  激光器。材料加工用的连续激光器要求输出功率高、结构紧凑、工作运行可靠和一次充入工作气体可长时间运行等特点。

1) CO<sub>2</sub> 激光器电极结构 横流三轴正交式大功率连续 CO<sub>2</sub> 激光器的辉光放电,主要采用以下两种不同的电极结构(图 3-34):

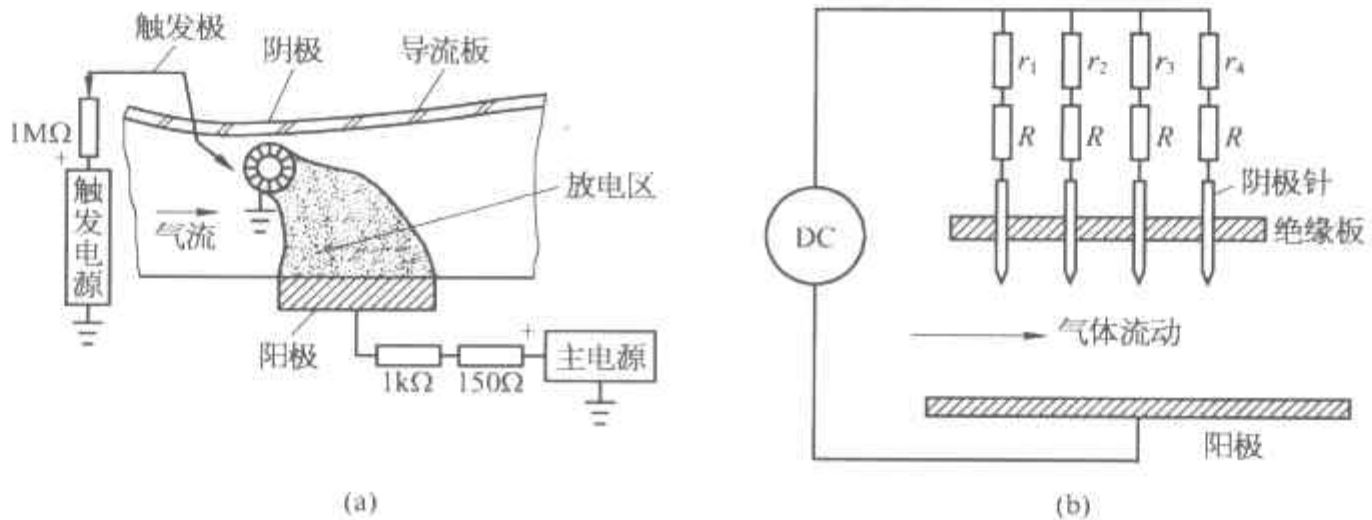


图 3-34 CO<sub>2</sub> 激光器的电极结构示意图  
(a) 管-板式; (b) 针-板式

- (1) 管-板式结构。采用管形阴极与条状阳极,工作气压较低,如 4~6.7 kPa;
- (2) 针-板式结构。采用针形阴极与平板阳极,工作气压较高,如 12~46.6 kPa。

2) 光学谐振腔 当光通过反转分布的激光介质时将被放大,但真正的激光发射还要经过振荡放大,这在光学谐振腔内进行。采用两个反射面的反射使光的电磁场始终维持在装置内部,经多次往复运动和不断放大,获得轴向受激放大光的结构称为光学谐振腔。光学谐振腔有多种结构,最为常用的是由两个球面镜或平面镜构成的共轴球面光学谐振腔。它的另一个作用是控制输出激光束的特征,如光束的横向分布、光斑尺寸、谐振频率和光束发散角等。

3) 激光的纵模和横模

(1) 纵模。激光产生振荡放大的前提条件是光波在光学谐振腔内经过两次反射后,其位向与初始光波相同,使光波因干涉得到加强,即为入射波与二次反射波的相位差是  $2\pi$  的整数倍  $q$ (也称形成驻波),则  $q$  常称为谐振腔纵模。

(2) 横模。谐振腔内,光波在横向截平面内的各种稳定分布称为谐振腔的横模,用 TEM<sub>mn</sub> 表示 (Transverse Electromagnetic Modes, TEM)。对轴对称情况,  $m, n$  分别表示 X 方向和 Y 方向的暗区数,对旋转对称情况,  $m$  表示径向节线(暗环)数,  $n$  表示角向暗直径数,分别见图 3-35。

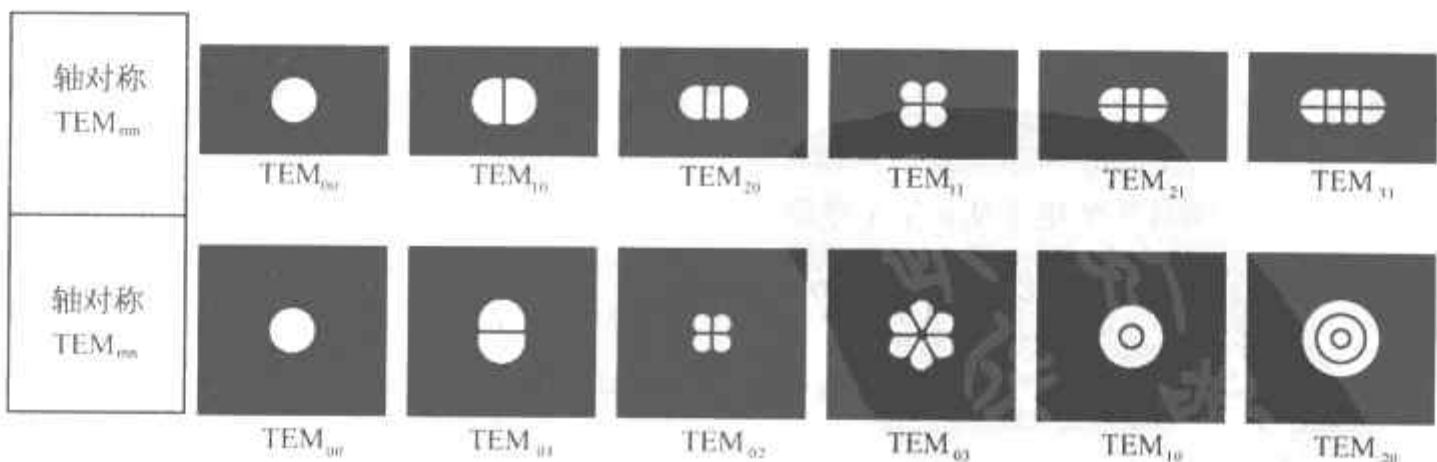


图 3-35 CO<sub>2</sub> 激光的横模示意图

同时考虑谐振腔光波场的纵模和横模,则用 TEM<sub>mnq</sub> 表示,因为光腔尺寸远大于光波波长,所以  $q$  是一个很大的整数,为  $10^1 \sim 10^7$  量级,一般不表示出来。

4) 横流 CO<sub>2</sub> 激光器的主要技术参数 国内某激光设备有限公司生产的管-板式放电结构的横流 CO<sub>2</sub> 激光器主要技术参数见表 3-73。

表 3-73 横流 CO<sub>2</sub> 激光器主要技术参数

型 号	多 模	HJ-2000	HJ-5000	HJ-7000
	低价模	HHJ-1500	HHJ-3000	HHJ-4500
输出波长(μm)		10.6	10.6	10.6
额定输出功率(W)	多 模	2 000	5 000	7 000
	低价模 TEM <sub>11</sub>	1 500	3 000	4 500
光束发散角(mrad)	多 模	≤10(全角)		
	低价模 TEM <sub>11</sub>	≤3.0(全角)		
光电转换效率	多 模	≥15%		
	低价模 TEM <sub>11</sub>	≥10%		
功率不稳定性	≤±2%			
封闭条件下工作寿命(h)	≥8			
工作气体压力(Pa)	≤85×133.3			
工作气体比例	CO <sub>2</sub> :N <sub>2</sub> :He = 1:8:11			
运转噪声(dB)	≤70			
最大耗电功率(kVA)	25	50	70	
外形尺寸(长/m×宽/m×高/m)	1.8×1.0×2.0	3.0×1.0×2.0	4.5×1.0×2.0	
激光器质量(kg)	1 600	3 200	4 500	

### 3. 半导体激光器

半导体激光器是利用半导体中的电子跃迁引起光子受激发射的一种高效率电子-光子转换器件。自 1962 年制得液氮温度下脉冲激射的 GaAs 激光器和 1972 年实现室温连续激射的双导质结构二极管激光器(Diode Laser, DL)后,DL 取得了显著发展,1991 年首先报道应用于材料加工。现在已有市售的 4~6 kW 的高功率 DL 器件,具有与材料加工上的其他高功率激光器相持衡的水平。

高功率二极管激光器的特点:① 结构紧凑、体积小、重量轻,包括必须的散热片和电源装置也是非常小的小型系统;② 高光电转换效率,最大可达 50%~70%,比 CO<sub>2</sub> 激光器、Nd:YAG 和准分子激光器的 10%~15%、1%~5%和 1%~2%的效率高出很多;③ 运行寿命长,一般可达数十万小时以上;④ 运行价低;⑤ 能直接调制;⑥ 可使用几伏低电压注入毫安级电流激励;⑦ 材料对之吸收率高,不需要进行黑化处理。其前景发展很大。

DL 产生粒子数反转的激光工作物质是直接带隙型半导体材料,现在普遍采用 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As 和 Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub>等周期表上 III-V 族元素的三元和四元半导体化合物。随材料不同,激光的波长也有所不同,见表 3-74。掺杂在半导体中的电子从价带至导带实现集居数反转分布,同时采用半导体晶体的两个相对解理面形成 Fabry-Parot 光学谐振腔使光增益达到阈值,并采用低压电源激励实现粒子数反转,从而构成激光器外部结构的三个部分。二极管激光器应用于热处理的功率密度为 10~20 kW/cm<sup>2</sup>。

表 3-74 二极管激光器的材料及对应的波长

材 料	AlGaAs	InGaAs	AlGaInP
对应波长	720~880	940~990	630~690

## 二、激光加热金属的特点

激光加热钢铁工件的特点见表 3-75。

表 3-75 激光加热钢铁工件的特点

加 热 特 点	具 体 说 明
以激光作为能源,以极快速度加热工件的自冷淬火(属非直接接触的加工方式)	钢铁工件表面受到快速移动的激光束照射,工件表面与束斑相关的一定体积依靠吸收激光束能量和热传导瞬间升温达到奥氏体化,并在激光束移开后,因其与基体之间存在极大的温度梯度发生极快速的自激淬火获得马氏体组织
极快的加热和极快的冷却过程	激光束的加热功率密度达 $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ ,工件的加热速度一般为 $10^4 \sim 10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$ ;同时工件自激淬冷的冷速极快,可达 $10^6 \sim 10^8 \text{ }^\circ\text{C/s}$
激光淬火工件具有更高的硬度、耐磨性和疲劳强度	工件激光淬火后的组织细密,与其他普通淬火和感应淬火相比,表面硬度约提高 $15\% \sim 20\%$ ,耐磨性和使用寿命大幅度提高,处理表面具有高的压应力,使工件的疲劳抗力提高
处理工件的畸变量减小,可减少或免除后续加工	激光淬火仅限于工件表面,加热速度很快,致使工件热影响区小,工件畸变量减小(特殊工件畸变可以应用处理方式调整降至最小),从而可以免除后续加工;同时激光淬火不发生脱碳,粗糙度也很少变化,可显著降低成本和增加生产效率
具有柔性作业特点:高可靠性和重现性,易整合成高效生产线	激光淬火在经过一定实验验证后,易于控制工艺处理参数,可靠实现淬硬硬度和深度的技术要求,同时能快速完成淬火过程,易于整合进入自动化生产线
能完成工件表面局部和特殊部位的淬火,相对其他热处理方法具更大灵活性	激光淬火特别适合易变形工件的局部淬火和特殊部位(如深孔、内壁、槽沟内角等难处理部位)的淬火,尤其对大型工件局部区域的淬火,可大量节约能源。为此它已成为一定零部件不可替代的表面处理方法
具有自激淬冷特点,可减少淬火剂的污染	工件局部加热区域是依靠基体的热传导方式进行冷却的,速度一般远大于材料的临界冷速,获得细小马氏体组织,可减少水或油的淬火剂污染,有利于生态和环保
淬火获得淬硬深度受限制,不适合整体和整个表面要进行淬火的情况	钢和铸铁激光淬火后的典型深度一般为 $250 \sim 750 \mu\text{m}$ 和 $100 \sim 300 \mu\text{m}$ ,对有些钢淬硬深度可达 $0.5 \sim 3.5 \text{ mm}$ ;一般不适合整体材料和整个表面要进行淬火的情况,虽然表面可应用搭接方法,但会产生软带缺陷
工件需要预先黑化处理,提高 $\text{CO}_2$ 激光的吸收率	所有金属对 $\text{CO}_2$ 激光吸收率低,处理工件要求对激光淬火部位预先涂覆吸热涂料(俗称黑化),在大规模生产时可相应建立自动化生产线保证涂层一致和均匀
激光加工设备投资比较大,设备光电转换率较低	设备光电转换率: $\text{CO}_2$ 激光器约 $10\% \sim 15\%$ ,固体激光器约小于 $4\%$ ,准分子激光器约 $1\% \sim 2\%$ ;但二极管激光器可达 $30\% \sim 60\%$

### 三、激光淬火

激光淬火是用激光作为能源,以极快速度加热工件的自冷淬火。它是激光表面改性工艺的一种,其他还有熔融处理、激光合金化、激光熔覆、激光非晶化和激光冲击硬化等。但研究最早,应用最广,技术最为成熟的是激光淬火,既能提高工件的表面硬度、强度、耐磨性和耐蚀性,又能使工件心部保持原来的综合力学性能。

#### (一) 激光淬火的适用钢材和铸铁

凡能发生马氏体相变的材料均适合激光淬火,如需要表面硬化的低、中、高碳钢及合金钢,球墨铸铁、灰口铸铁、可锻铸铁和蠕墨铸铁等。

#### (二) 激光淬火前的准备工作

激光淬火前的准备工作见表 3-76。

表 3-76 激光淬火前的准备工作

准备工作名称	具 体 内 容
工件原始状态准备	1) 工件加工表面一般为最后表面,其尺寸、精度、表面粗糙度等均应符合图纸要求 2) 工件表面不应有锈迹、油污、毛刺和氧化皮,做好相应清洁工作
工件原始组织准备	1) 工件原始组织应均匀细小 2) 应根据材料种类、成分和性能要求选择退火态、正火态和调质态的预备热处理状态 3) 原始组织为调质态时,在一定处理工艺参数下可获得较大的硬化层深度,其硬度也较高 4) 原始组织为退火态时,在一定处理工艺参数下,硬化层深度较浅,其硬度也较低些 5) 对共析钢,原始组织为粗片状珠光体,易获得粗片状 M;原始组织为细片状 P,易获得细片状 M;注意尽量不采用粗粒状 P 作原始组织
工件表面进行增强 CO <sub>2</sub> 激光吸收的预处理(一般要求吸收率高达 90% 以上)	1) 工件表面需激光硬化部位均匀喷刷一层吸收激光能量的覆层或进行磷化处理,厚度控制适当 2) 涂覆材料应满足下列要求:① 对 10.6 μm CO <sub>2</sub> 激光具有高的吸收能力;② 能经受高温和好的化学稳定性;③ 导热性良好,易于向工件传导热量;④ 与金属表面附着良好;⑤ 不能与工件表面产生化学反应;⑥ 不易诱发处理表面出现裂缝;⑦ 易于涂刷、干燥和清除,厚薄易于控制;⑧ 成本低,无毒、无害,无刺激性气味
激光热处理设备准备	1) CO <sub>2</sub> 激光器准备就绪,包括导光聚焦系统、功率计及参数测量与控制系统,屏蔽装置和对准装置应正常运行 2) 激光加工机或激光加工中心准备就绪 3) 处理工件安装就绪

### (三) 激光淬火工艺

激光淬火工艺见表 3-77。在操作中了解影响激光处理结果的工艺参数及确定工艺参数是十分重要的。

表 3-77 激光淬火工艺

名 称	具 体 说 明
激光淬火工艺参数关系	处理材料确定后激光淬火工艺参数包括激光束模式、激光输出功率 $P$ 、激光束斑直径 $D$ 、激光束(或工件)扫描移动速度 $v$ 及表面预处理(决定激光能量吸收率)等 1) 激光束模式一般采用多模(或称高阶模) 2) 激光淬火后的淬硬深度 $H$ 与 $P$ 、 $D$ 和 $v$ 的关系为: $H \propto P/(D \cdot v)$ ,一般 $P$ 和 $D$ 确定后,改变 $v$ 控制 $H$ 值;扫描速度太慢易出现熔化现象,太快则可能淬不硬 3) $H$ 和 $D$ 值一定,增加 $P$ 时, $v$ 增加,可提高生产效率 4) 激光功率密度 $W$ ,与 $P$ 和光斑面积 $S$ 的关系为: $W = P/S$ (当光斑为圆形时 $S = \pi D^2/4$ ),增加 $P$ 则增加 $W$ ,两者基本上是同等的
搭接系数	1) 激光束在工件表面扫描,分不发生搭接和发生搭接两种情况 2) 搭接系数计算公式: $\text{搭接系数} = \frac{\text{搭接宽度}}{\text{光斑宽度}} \times 100\%$ 光斑宽度一般为激光束斑直径 $D$ 3) 搭接系数宜取 5%~20% 4) 发生搭接部位的激光处理硬度较低些,有的称出现软化带
工艺参数确定	1) 根据激光淬火工件的材料特性、形状、尺寸、表面质量、预处理和技术要求,参照以往的累积数据或经验选定激光淬火试验工艺参数 2) 按选定工艺参数进行激光淬火试验 3) 分析和测试试验试样,对照技术要求看是否符合 4) 如未符合,继续调整工艺参数再行试验淬火直至符合技术要求为止 5) 根据试验确定工艺参数指导生产
完成淬火操作	严格按确定的工艺参数完成操作,并且留下试样作检查,操作中对作业情况做好记录

#### (四) 应用实例

不同材料不同工艺参数下激光淬火的处理结果见表 3-78。

表 3-78 几种材料激光淬火的工艺参数和处理结果

材 料	功率密度 ( $\times 10^3$ W/cm <sup>2</sup> )	激光功率 (W)	扫描速度 (mm/s)	硬化宽度 (mm)	硬化深度 (mm)	硬度 HV	显微组织	备 注
20	4.4	700	19	2.33	0.3	476.8	板条马氏体 + 少量针状马氏体	涂料, 碳素墨汁
45	2	1 000	14.7		0.45	770.8	细针状马氏体	预处理, 磷化
T10	10	500	35	1.4	0.55	841	隐针马氏体 + Fe <sub>3</sub> C(碳化物)	
T12	8.0	1 200	10.9			1 221	针状马氏体	
40Cr	3.2	1 000	18		0.28~0.6	770~776	板条马氏体和片状马氏体的混合组织	
40CrNiMoA	2	1 000	14.7		0.29	617.5	隐晶马氏体 + 合金碳化物	
20CrMnTi	4.5	1 000	25		0.324~0.39	462~535		
GCr15	3.4	1 200	19		0.45	941	隐晶马氏体	涂料, 碳素墨汁
GCr15	3.2	1 000	20		0.156~0.276	494~473	残留碳化物细小均匀, 马氏体细小	
50CrV		<1 500	32.3~47.2	3.6~3.8	0.35~0.47	66.5~67 HRC	表面粗马氏体, 底部隐针马氏体	
W18Cr4V	3.2	1 000	15		0.518	927~1 000	淬火组织: 心部原始晶粒度为 10 级, 淬火层的晶粒度 11~12 级, 马氏体细小	

#### (五) 激光淬火件的质量检验

激光淬火件的质量检验见表 3-79。

表 3-79 激光淬火件的质量检验

项 目	具 体 说 明
外观检查	1) 用低倍放大镜检查处理表面, 不允许存在裂缝、伤痕、蚀坑和影响使用的其他缺陷 2) 用手触摸激光扫描带, 允许有微凸感觉 3) 处理表面不允许有熔化现象, 对激光淬火工件需进行后加工的, 熔化层深度不得超过磨加工余量
表面粗糙度检测	1) 按 GB/T1031 和 GB/T3505 评定处理表面粗糙度 2) 激光淬火作为最后工序的工件, 表面粗糙度降低不得超过一个级别
硬度检测	1) 表面硬度测定: ① 采用 9.8~98 N 负荷的维氏硬度计 (GB/T4340.1) 或小负荷维氏硬度计 (GB/T4340.1) 测量; ② 硬化层深度小于 0.2 mm 时, 硬度计负荷小于 49 N; ③ 采用其他硬度法测得数据供参考; ④ 对铸铁的激光淬火表面可用负荷不大于 1.96 N 的显微硬度测定 2) 硬度分布测定: ① 测定试样按金相检测试样制备; ② 应用显微硬度法 (GB/T4342 及 GB/T9790) 测量激光淬火件的硬化层的硬度分布



(续表)

项 目	具 体 说 明
显微组织检测	1) 取样应具有代表性,测定激光淬火硬化层深度、宽度、硬度梯度和硬化区显微组织时,一般取垂直于处理表面和垂直于扫描带的横截面作为观察面 2) 仔细制样,观察面应平行减薄 3) 采用较缓腐蚀剂显示组织细节便于测试 4) 激光淬火部位经腐蚀后一般呈月牙形,见图 3-36 5) 仔细测试月牙形不同坐标处的显微组织,了解组织分布,并可以和下一步测试硬度性能相联系 6) 仔细测试沿月牙形深度和宽度方向开始形成奥氏体和全部形成奥氏体(淬火后转变为马氏体)处的坐标数据。从理论上讲,它们对应着这材料的 $A_{c1}$ 和 $A_{c3}$ ( $A_{cm}$ ) 加热温度处,即对应着全淬火硬化层和在二相区加热淬火层深度和宽度(相变硬化区) 7) 相变硬化区以外的热影响区的显微组织与基体原始组织相比有一定的变化,如晶界迁移和第二相析出等,要仔细识别,对应的硬度测试差别一般不大
硬化层深度和宽度测量	1) 根据金相试样经浅腐蚀后沿月牙形最大硬化层深度线和离处理表面一定深度的平行线上选定一定间隔距离测定硬度值并制成分布曲线 2) 按 GB/T18683 确定总硬化层深度和有效硬化层深度(极限硬度值按技术要求定) 3) 按决定硬化层深度和有效硬化层深度原则在测定的硬度宽度方向上的曲线上确定硬化层宽度和有效硬化层宽度后,按月牙形曲线外延至试样表面的坐标值确定总硬化层宽度和有效硬化层宽度值 4) 或按 GB/T18683 中 6.6 另行制样测定总硬化层宽度和有效硬化层宽度

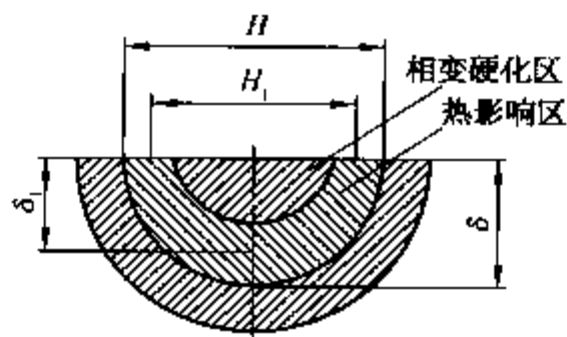


图 3-36 激光淬火部位月牙形示意图

## 第六节 气相沉积表面改性

近三十年来,气相沉积是材料表面改性中获得迅速发展和广泛应用的表面涂层技术。气相沉积是利用气相中发生的物理、化学过程,在工件表面沉积固态膜层的一种工艺方法。应用气相沉积可以获得微米级或纳米级的单层或多层的新材料,它们是具有特殊的物理性能或化学性能或力学性能的与基材具有不同结构的新材料。

### 一、概述

#### 1. 气相沉积的基本过程

气相沉积的基本过程为:①沉积室中气相物质产生;②气相物质传输;③气相物质在工件表面上沉积成固态薄膜。其明显的特点是需镀物料,不管是固体、液体或气体,在传输时都要转化成气相形态,然后迁移传输至工件表面进行沉积。

#### 2. 气相沉积方法的分类

按照薄膜沉积过程机理不同,气相沉积工艺方法分物理气相沉积(Physical Vapor Deposition, PVD)和化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition, CVD)两大类,相应的定义和基本方法见表 3-80。

表 3-80 气相沉积工艺的分类和方法

工艺名称	定 义	基 本 方 法	常用的工艺方法
PVD	在真空加热条件下利用蒸发、辉光放电、弧光放电和溅射等物理方法提供原子、离子,使之在工件表面沉积形成薄膜的工艺方法	真空蒸发镀,溅射镀,离子镀	离子镀,溅射镀
CVD	通过分解、化合、还原和置换等 11 种化学气相反应在工件表面形成薄膜的工艺方法	常压 CVD, 低压 CVD, PECVD, MOCVD, MBE	HTCVD(高温), MTCVD(中温), 直流脉冲或微波 PECVD

应该指出,区分 PVD 和 CVD 原来主要看是否通过化学反应来获得沉积物粒子,现在随着技术的发展,已不再存在这种差别了,现在的差别似乎只在于使用镀膜物料的形态,前者利用固相或液相物质,后者则利用易挥发的化合物或气态物质。显然,PVD 与 CVD 已失去原来定义的内涵实质。PVD 和 CVD 技术各自的特点见表 3-81。

表 3-81 PVD 和 CVD 技术的特点

工艺名称	PVD	CVD
主要特点	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 所有 PVD 方法都在高真空条件下进行,设备较为复杂</li> <li>2) 应用物理方法(如蒸发、放电、溅射)提供沉淀物粒子</li> <li>3) 除蒸镀外,均在气体放电的等离子状态中进行,工件作为基板,带有电荷</li> <li>4) 沉积温度低,工件不易畸形,一般可以不影响基材的性能,扩大了基材范围</li> <li>5) 当通入反应气体(通常是一种碳氢化合物、<math>N_2</math>、<math>NH_3</math> 或 <math>O_2</math> 等)可以获得碳化物、氮化物或氧化物涂层</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 在工件表面气相物质进行化学反应,反应生成物形成固态膜层</li> <li>2) 可沉积的元素和化合物种类多,可得梯度膜和混合涂层</li> <li>3) 涂层成分易于控制</li> <li>4) 沉积温度高,通常在 <math>850\sim 1100^\circ C</math></li> <li>5) 绕镀性好,涂覆均匀</li> <li>6) 可在常压或低压下进行沉积</li> <li>7) 设备较为简单,适合于大批量生产</li> <li>8) 有一定的环境污染和腐蚀性</li> </ol>

## 二、物理气相沉积技术

物理气相沉积技术是主要利用物理过程来沉积薄膜的技术。其最初和最成功的发展是在半导体工业、航空航天等特殊领域,在机械工业中作为一种新型的表面强化技术起始于 20 世纪 80 年代初。和化学气相沉积相比,物理气相沉积适用范围广泛,几乎所有材料的薄膜都可以用物理气相沉积来制备。物理气相沉积的主要方法有真空蒸发镀、溅射镀和离子镀,三种物理气相沉积方法的特点及比较分别见表 3-82 和表 3-83。

表 3-82 真空蒸发镀、溅射镀和离子镀的一般特点

工艺方法	真空蒸发镀	溅 射 镀	离 子 镀
特 点	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 在高真空下进行,膜层致密度高,易获得高纯度光滑镀层</li> <li>2) 过程简单,工艺参数少,易于控制</li> <li>3) 一般情况基片不加偏压</li> <li>4) 膜基结合力较差</li> <li>5) 绕涂性差,工件涂覆部位要对准蒸发源或镀源物料</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 除离子溅射外,各种溅射镀均在等离子体中进行,靶材(源材料)带负偏压为阴极</li> <li>2) 可获得各种材料的膜层。在各类 PVD 方法中,溅射镀最易控制膜的成分和性质</li> <li>3) 基板温度低,工件变形小,膜层受等离子体损伤比离子镀小</li> <li>4) 可进行较大面积和厚度均匀的镀膜</li> <li>5) 膜基结合比蒸发镀好</li> <li>6) 绕镀性较差,面对靶材方位沉积效果好</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 基本原理为真空蒸发镀和真空溅射结合起来</li> <li>2) 基板(工件)带负偏压</li> <li>3) 绕镀能力强</li> <li>4) 镀层组织致密,膜基结合力强</li> <li>5) 适用的膜材,镀源材料种类多,基体材料可有多种金属与合金、陶瓷、玻璃和塑料等,膜层有多种金属及合金、化合物</li> </ol>

表 3-83 真空蒸发镀、溅射镀和离子镀三种物理气相沉积方法的比较

特点		方法		
项目		真空蒸发镀	溅射镀	离子镀
镀金属		可以	可以	可以
镀合金		可以(较困难)	可以	可以(较困难)
镀高熔点化合物		可以(但困难)	可以	可以(但困难)
获得沉积物粒子的方式		热蒸发	辉光放电、阴极(靶材、镀膜料)溅射	热蒸发、气体放电、反应气电离及激活
镀室真空度(Pa)		$10^{-3} \sim 10^{-5}$	$2 \sim 10^{-1}$	$2 \sim 10^{-2}$
沉积过程特点		工件(基板)不带电,镀膜料在真空条件下被加热蒸发、沉积到工件表面,沉积粒子的能量与蒸发温度相对应	工件为阳极,靶材为阴极,正离子轰击阴极,溅射出靶材原子,沉积于工件表面,沉积原子的能量由靶材溅射原子的能量分布决定	真空蒸发镀加等离子体。沉积过程在等离子体中进行。工件带负偏压,镀膜料蒸气和反应气被电离或激活,沉积于工件表面
沉积粒子能量(eV)	中性原子	0.1~1	1~10	0至数千,蒸发原子0.1~1,平均45~225(基板偏压1~5 kV)
	离子			数百至数千,平均100~500(基板偏压1~5 kV)
沉积速率( $\mu\text{m}/\text{min}$ )		0.1~70	0.01~0.5(磁控溅射可接近真空蒸发镀)	0.1~50
绕镀性		差	较好	较好
膜层特点	密度	低温时小	大	大
	气孔	低温时多	少	很少
	膜基结合力	不高	较高	高

### (一) 真空蒸发镀

简称蒸镀。在真空中受热熔化的镀源物料蒸发出金属、合金或化合物粒子凝聚沉积于被涂工件表面形成膜层。

#### 1. 蒸发镀装置

蒸发镀装置主要包括真空室、抽真空系统、镀源物料、工件基板和蒸发源加热系统。镀源物料被加热的方法有电弧加热、电阻加热或感应加热,还有利用电子束、激光束和离子束的局部加热方式等,见图 3-37。

1) 真空室 真空度为  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  Pa,金属材料在此条件下的蒸发温度比在 1 大气压下的温度大幅下降,熔化蒸发过程缩短,蒸发效率提高,同时蒸发的气相粒子的平均自由程  $\lambda$  变大,气相粒子几乎不经过碰撞径直飞达温度处于较低的工件表面凝结成膜。通常将镀源物料加热到使其平衡蒸汽压  $P$  达到几帕的温度称为蒸发温度  $T$ ,材料蒸发的饱和气体压力  $P_s$  ( $\mu\text{mHg}$ ) 与温度  $T$  之间的近似关系为:

$$\lg P_s = A - B/T$$

式中  $A, B$ ——试验常数,其值与材料有关,可查阅有关文献求得;

$T$ ——绝对温度。

2) 基板 工件作为基板,被夹持在基板架上,位于镀源物料的正对面。它与镀源物料的距离  $L$  应远小于气体分子运动的平均自由程  $\lambda$ 。当  $P_s = 1.33 \times 10^{-3}$  Pa 时,  $\lambda = 500$  cm, 当  $L = 0.1\lambda$ , 约有 5% 的蒸发原子在蒸发源至工件行进中发生碰撞。为此为避免气相粒子发生碰撞,应使  $L \ll \lambda$ 。

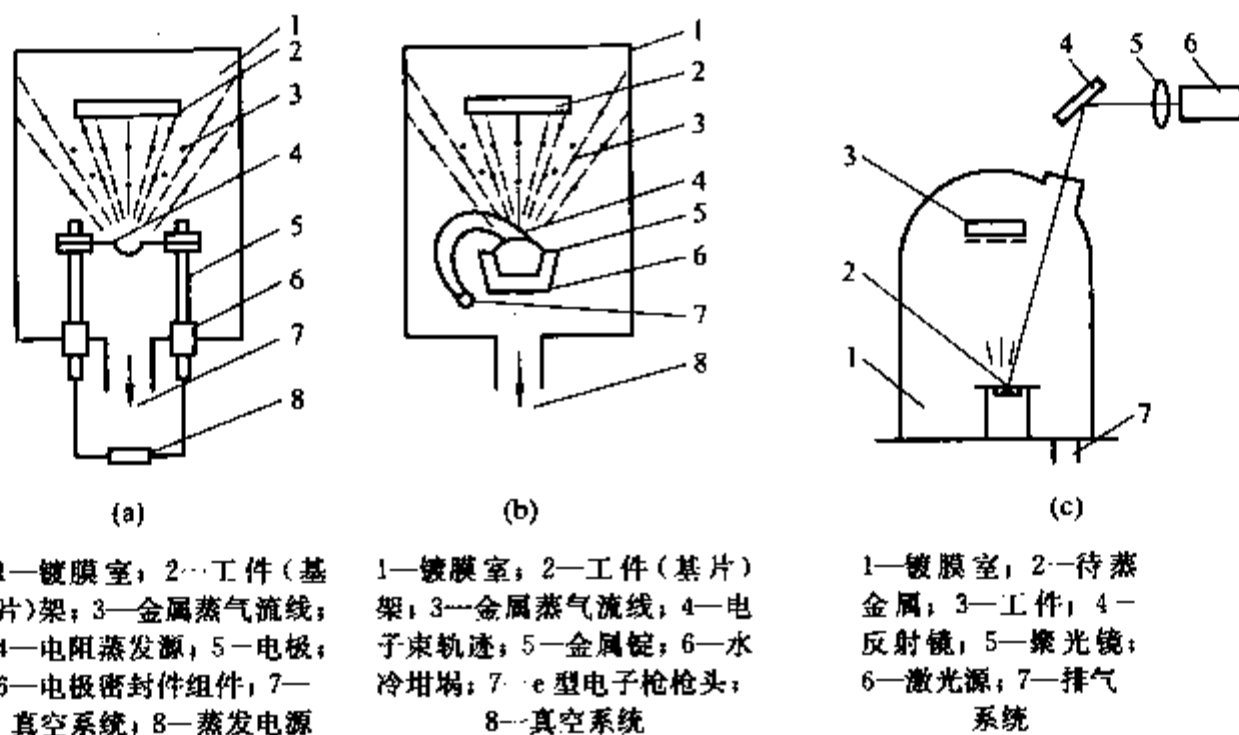


图 3-37 真空蒸发镀装置示意图

(a) 电阻加热方式; (b) e 型电子枪加热方式; (c) 激光束加热方式

### 3) 蒸发源加热系统 使镀源物料蒸发气化的系统,一般以下几种:

(1) 电阻蒸发源、常选用 W、Mo、Ta 对高熔点金属起加热蒸发作用。对高熔点材料则需用电子束、激光束或离子束等。

(2) 电子束蒸发源: 利用电子枪发射电子束,加热镀源物料使其熔化蒸发。按电子束轨迹可分直射式、环型和 e 型几种。目前主要用 e 型电子枪(电子束轨迹在磁场作用下偏转  $270^\circ$ ),并设置电子束轰击镀源物料时激发的二次电子的吸收极,以消除有害影响。

(3) 激光束蒸发源: 一般采用高能量密度的  $10.6 \mu\text{m}$  波长的  $\text{CO}_2$  激光照射镀源物料表面,使之熔化而蒸发。

### 2. 蒸发镀工艺过程

蒸发镀主要工艺步骤如下:

(1) 基片表面清洁净化,包括真空室内壁、安装工件基板架和基片要在真空中蒸发洁净。

(2) 真空室的真空抽至  $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ Pa}$ ,对基片和镀源物料预处理: ① 基片加热除水干燥和基片(工件)表面吸附气体的脱附,由真空泵排出室外,提高真空度和增加膜层纯度以及膜基结合力。② 蒸发源对镀源物料预热使镀源物料脱水脱气。先用挡板遮盖蒸发源和镀源物料。在镀源物料加热到蒸发温度时再移开挡板进行蒸发镀。③ 蒸发镀: 选定适当的基片温度、镀源物料蒸发温度和沉积气压(即镀室的真空度)工艺参数,使蒸发镀原子几乎不与残存气体分子和相互之间发生碰撞,以一定能量到达基片表面进行扩散迁移,获得致密、光滑的高纯度膜。真空度低则易获得粗柱状晶的粗糙膜层。④ 取出工件: 镀层厚度达到后,挡板遮盖蒸发源及源物质,停止加热,继续在真空下冷却  $15 \sim 30 \text{ min}$ ,降温至  $100^\circ\text{C}$  后,导入空气取下工件。

应指出,基片加热温度对膜层组织有明显影响,一般当基片温度升至  $0.5T_m$  ( $T_m$  为镀料熔点, K),可得到再结晶组织,消除柱状晶,当温度升至  $0.3T_m$  时,可消除蒸气原子在冷基片上形成的岛状晶核长成的锥状晶。生产中正是通过控制基片加热温度来获得所需要的镀层组织。

目前,蒸发镀主要应用于光学、电子工业上,主要针对结合力要求不高的功能膜沉积。现在已发展起反应蒸发镀和激励反应蒸发镀,前者是在沉积区通入一定浓度的反应气(通常是碳氢化合物、 $\text{N}_2$ 、 $\text{NH}_3$  或  $\text{O}_2$ ),从而获得沉积镀源物料的碳化物、氮化物或氧化物等。后者是在反应蒸发镀上增加激励等离子体,来增加膜基之间的结合力。

### (二) 溅射镀

溅射是在真空条件下应用具有几十电子伏特以上动能的荷能粒子轰击固体材料,使材料表面的原子或分子获得足够能量脱离约束逸出到气相中的现象。溅射镀是将溅射出来的粒子收集后在工件表面沉积成膜的一种工艺方法。

### 1. 溅射镀膜原理

(1) 溅射现象：在溅射镀膜中，受荷能粒子轰击，溅射出沉积膜粒子的材料称为靶。这种荷能粒子一般为离子，为此，溅射镀也是一种离子镀技术。如果应用单独离子源获得荷能的离子束则为离子束溅射，其价格较贵、结构复杂，应用于特定场合。工业上广泛应用的溅射镀是利用在真空中的低压气体放电获得等离子体，使这种离子轰击靶材，溅射出沉积粒子凝聚沉积于工件上成膜。这时靶材常加负偏压，称为阴极溅射镀膜技术。

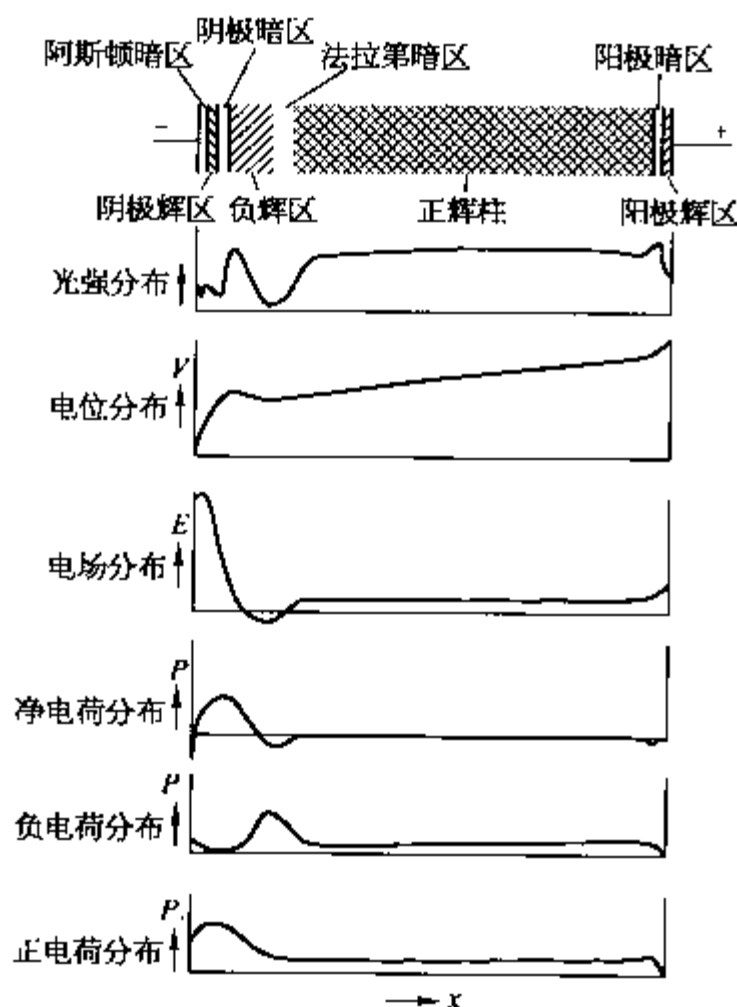


图 3-38 低压气体辉光放电示意图

(4) 气体辉光放电：在真空室内安置两个电极，通入 0.1~10 Pa 的 Ar，外加直流高压大于着火电压（起始放电电压）时，气体被击穿，变成良导体，这时电流上升，电压下降。两极间出现明暗相间的光层。图 3-38 为辉光放电示意图。

辉光放电分正常和异常辉光放电两类（图 3-39）。在异常辉光放电时，阴极表面全部布满辉光，电流进一步增大，必须提高阴极压降和提高电流密度。此时，轰击阴极的离子数目和动能都比正常辉光放电时的大为增加，因而在阴极发生的溅射作用强烈。

### 2. 溅射装置

1) 直流二极溅射装置 示意图见图 3-40a。源材料为靶阴极，接 1~3 kV 直流负偏压。基板为阳极，上放置基片工件。阴阳极距离 6 cm 左右。真空室先抽至  $10^{-2} \sim 10^{-3}$  Pa，通入 Ar 至 10 Pa。接通直流高压，产生辉光放电，在两极间建立等离子区。使  $Ar^+$  轰击靶材发生溅射。溅射出的原子或分子的粒子沉积在基片（工件）表面形成靶材材料的薄膜。它具有结构简单，操作方便的优点，但溅射沉积速率低，约  $0.03 \sim 0.05 \mu m/min$ ，不能镀 10  $\mu m$  以上厚膜。这种装置的基板温升会过高。

溅射镀膜的三个基本过程：① 靶材原子溅射；② 溅射原子（或粒子）向基板工件迁移；③ 粒子在基板工件表面沉积成膜。其中①最为主要。靶材的溅射产额和溅射原子的能量直接影响溅射镀的沉积速度和膜基的结合力。

(2) 溅射产额 S：指一个入射离子能溅射出的原子数目，单位为原子数/离子数，或称溅射速率。S 主要与入射离子的种类和能量、靶材的性质、离子入射角度三个因素有关。

入射离子是 Ne、Ar、Kr 和 Xe 等惰性气体离子，可得到高的 S 值，但考虑经济性，一般溅射设备都采用 Ar 作为工作气体。

入射离子能量  $W_i$ ，对大多数金属，存在溅射阈值  $W_c$ ，该阈值在 20~40 eV 范围。当  $W_i < W_c$ ，不产生溅射；当  $W_i > W_c$  和  $W_i < 150$  eV 时溅射产额 S 与能量的平方成正比；在  $W_i = 150 \sim 1000$  eV，S 正比于  $W_i$ ；当  $W_i > 1000$  eV 时，S 不再增加，甚至下降。在该条件下将进入高能离子注入阶段。

(3) 溅射原子的能量：热蒸发原子能量在 0.1~0.2 eV（在 1500 K 时大约为 0.2 eV）；溅射原子的能量约 1~10 eV，比热蒸发要大 1~2 个数量级。这种原子向基板迁移，并在基板上沉积，使这些原子仍具足够动能在表面扩散迁移，导致膜基结合力比蒸镀的高。

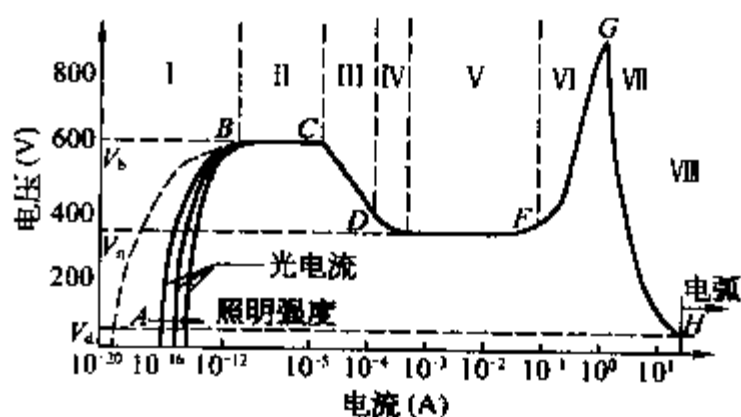
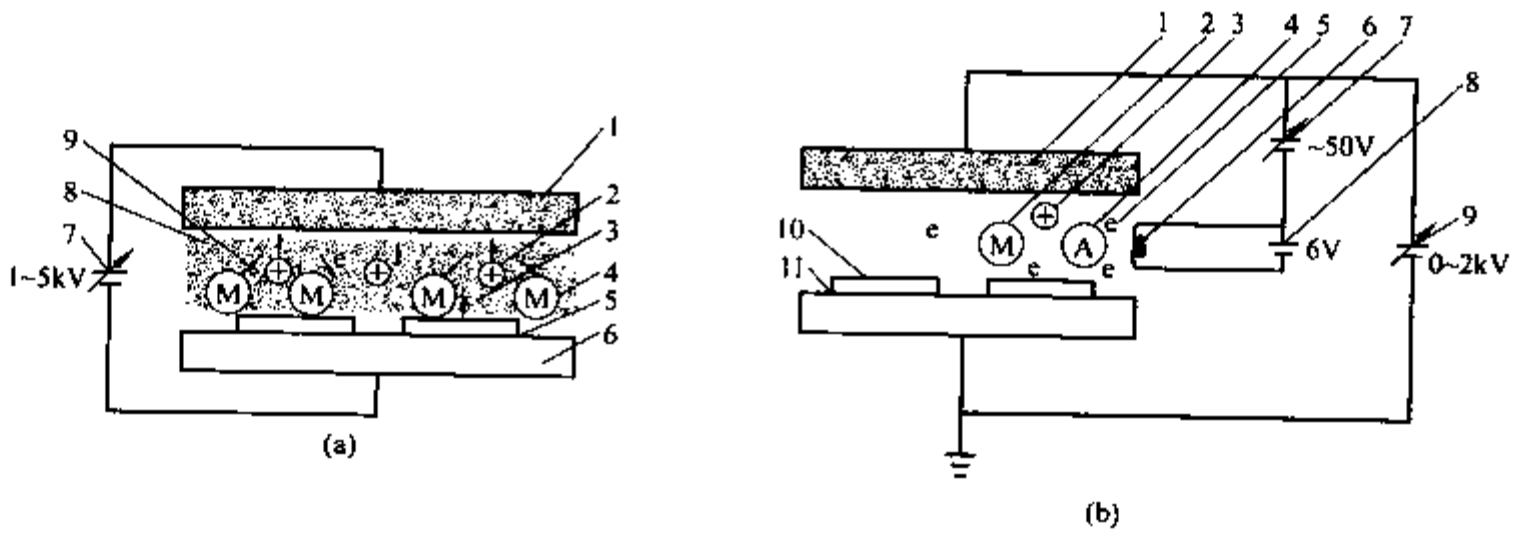


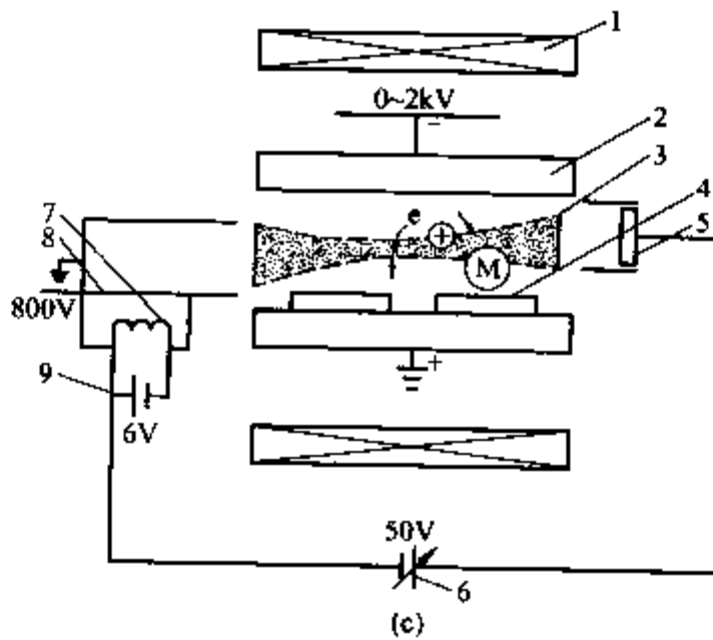
图 3-39 气体放电伏安特性曲线

I—非自持暗放电区；II—辉光放电区；III—电晕放电区；IV—前期正常辉光放电区；V—正常辉光放电区；VI—异常辉光放电区；VII—电弧放电过渡区；VIII—电弧放电区； $V_b$ —放电点燃电压； $V_n$ —正常辉光放电电压； $V_d$ —弧光放电电压



1—靶材；2—氩离子；3—电子；4—溅射，下来的金属原子；5—工件；6—工件架；7—靶电源；8—暗区；9—等离子体

1—靶材；2—溅射下来的金属原子；3—氩离子；4—氩原子；5—电子；6—热阴极灯丝；7—热阴极加速电源；8—热阴极加热电源；9—靶电源；10—工件；11—工件架



1—磁线圈；2—靶材；3—等离子体；4—工件；5—热阴极接受阳极；6—热阴极加速电源；7—热阴极灯丝；8—栅极；9—热阴极加热电源

图 3-40 直流溅射装置的原理示意图  
(a) 二极；(b) 三极；(c) 四极

2) 三极和四极溅射装置 相应装置的示意图见图 3-40b、c。三极装置是在二极装置基础上附加能发射热电子的连接 50 V 左右偏压的阴极(灯丝),热电子在电场力下穿过等离子体区,增加  $Ar^+$  与电子的碰撞几率,提高电流密度。三极装置比二极的沉积效率高,膜层纯度也有改善。

四极装置是在三极的基础上再设一个吸引热电子的电子收集极和镀膜室外增加聚束线圈,使电子在等离子区中作螺旋运动而增加碰撞电离几率,提高电流密度,具有较高沉积速率。但存在二次电子对基片的轰击和灯丝蒸发引起污染等问题。

3) 射频溅射装置 上述溅射装置均在直流高压电激发的等离子场中,称为直流溅射,不能沉积绝缘薄膜。而采用无线电波发射的频率(称射频)的交流电作为电源的溅射,可沉积绝缘薄膜,一般射频频率为 13.56 MHz。为了实现沉积薄膜,射频镀膜系统采用两个面积不等的金属电极的非对称平板结构,小电极表面产生的阴极压降比大电极的阴极压降大得多。大电极的面积达到使轰击其的离子能量小于溅射阈值,这样大电极表面不发生溅射。在小电极上装上靶材,在大电极上装上基片(工件)就可实现射频镀膜。同时实现受到电子轰击中和积累在上面的正电荷。射频溅射的靶电压较低,沉积气压较低,沉积速率较高见表 3-84。

表 3-84 几种溅射装置工艺参数和沉积速率比较

工 艺	靶偏压(kV)	工作气压(Pa)	电流密度(mA/cm <sup>2</sup> )	沉积速率(μm/min)
二级溅射	1~5	10 <sup>1</sup>	0.15~1.5	0.03~0.05
三级溅射	1~2	1~10 <sup>-1</sup>	1~3	0.05~0.1
四级溅射	0~2	1~10 <sup>-1</sup>	2~5	0.05~0.1
射频溅射	1~2	1~10 <sup>-1</sup>	1~3	0.05~0.1
磁控溅射	0.2~1	10 <sup>1</sup> ~10 <sup>-1</sup>	3~50	0.2~0.6

4) 磁控溅射装置 它具有基板(基片)温度低、沉积速率高、对膜层损伤小和应用靶材广的优点,目前在工业上广泛应用。

磁控溅射是在两极溅射阴性靶面上建立起一个环形封闭磁场,它一般由靶材内的永久磁铁产生,它具有平行于靶面的横向磁场分量。这个横向磁场分量与垂直于靶面的电场构成正交电磁场。从靶面溅射得到的二次电子受到阴极位降区的加速成为高能电子,它们在正交电磁场中作回旋运动,增加与气体分子的碰撞电离几率,这样得到的 Ar<sup>+</sup> 能十分有效地轰击靶面,提高溅射速率。一般磁控溅射的阳极位于阴极附近四周。基片(工件)不设在阳极上,而位于靶对面的悬浮的基片架上,这就大大减弱二次电子轰击基片产生的发热问题,即可使基片升温较小。

磁控溅射采用的真空度(工作气压)范围较宽,工作电压(靶偏压)低,一般为 600 V,工作电流密度高,一般为 3~10 mA/cm<sup>2</sup>,甚至可达数十毫安每平方厘米。溅射速率远高于其他溅射方法,与真空蒸发镀相近。溅射粒子能量比蒸发粒子高得多,使镀层质量和膜基结合力改善。

现在很多磁控溅射装置采用“非平衡磁控溅射”,这种溅射系统中的等离子区不只局限于靶面附近,已能扩展到基片,十分有利于溅射成膜。如已有 4 个非平衡磁控溅射靶封闭场结构的设备。

5) 离子束溅射 采用单独的离子源产生离子轰击靶材的溅射镀。离子源和镀膜室分开设置,离子束引出后进入镀膜室并轰击靶材产生溅射,并将靶材原子沉积于基片(工件)上。其镀膜室真空度高,膜层纯度高,但沉积速率很低,不适合大面积镀膜,其投资也大,工业应用受到限制。

6) 反应磁控溅射 在溅射过程中引入反应气体,使之与溅射粒子进行反应,沉积出化合物膜。如采用 Ti 靶并通入 Ar<sup>+</sup> + N<sub>2</sub> 或 Ar + C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 使沉积得到 TiN 或 TiC 膜。它可以在溅射金属或合金靶或化合物靶的同时供反应气体制备既定化学配比和非化学配比的化合物薄膜。反应气体是 O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、碳氢化合物或 NH<sub>3</sub> 等。

(三) 离子镀

离子镀是把真空蒸发镀和真空溅射镀结合起来的新镀膜技术。一般而言,离子镀是指在真空条件下,利用气体放电使工作气体和被蒸发物质(源物质)部分离子化,在这两种离子的轰击作用下,把蒸发物或其反应物沉积

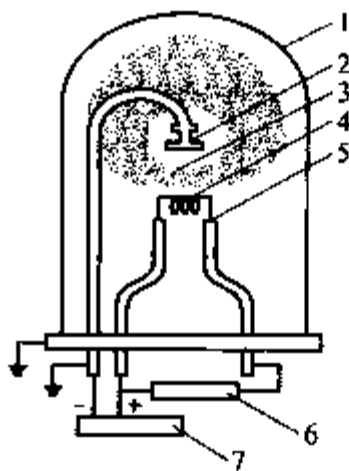


图 3-41 直流二极离子镀原理示意图

1—真空室; 2—基板; 3—工件  
4—基板负偏压电源; 5—主弧电源;  
6—氩气进气系统; 7—总电源

于施加负电位的被镀物体(基片)表面的过程。由此可知,实现离子镀是在基片(工件)前方的空间内达到三个必要条件: ① 镀料(源物料)的汽化; ② 产生气体放电; ③ 基片上施加负电位。基片上施加负电位是重要特征,用以加速离子,增加离子的能量。负偏压提供方式,一般是可调直流,近来兴起脉冲偏压方式。

1. 离子镀物理原理

直流二极离子镀技术的原理如图 3-41 所示。真空室为 10<sup>-3</sup>~10<sup>-4</sup> Pa,通入 Ar 使真空度达 1~10<sup>-1</sup> Pa,接通直流电压,基片上加 1~5 kV 的负偏压,在蒸发源(阳极)和基片(阴极)间建立低压气体放电的低温等离子区,在阴极负辉光区附近的惰性气体 Ar<sup>+</sup> 进入阴极暗区(克鲁克斯暗区)被电场加速并轰击基片(阴极)表面,有效洁净基片。同时汽化镀料物质的粒子进入等离子区,与其中的 Ar<sup>+</sup>、被激发的 Ar 原子及电子碰撞,部分被电离化和部分被激发化,Ar<sup>+</sup> 和电离的镀料离子被负高压电场加速,以较高能量(约几百至几千电子伏)轰击基片和镀层表面,并沉积成薄膜。为此,镀料粒子来源于蒸发,镀料粒子电离来源于气体放电形成等离子区,镀膜前对 Ar<sup>+</sup> 基片(阴极)的轰击清洁基片表面,镀膜时 Ar<sup>+</sup> 和镀料正离子对基片(阴极)轰击使沉积和溅射共存,由于沉积效应大于溅射效应,故能在基

片上成膜。离子镀的膜基结合力较高,膜层组织致密,但二极离子镀的沉积率较低,基片温升较高。

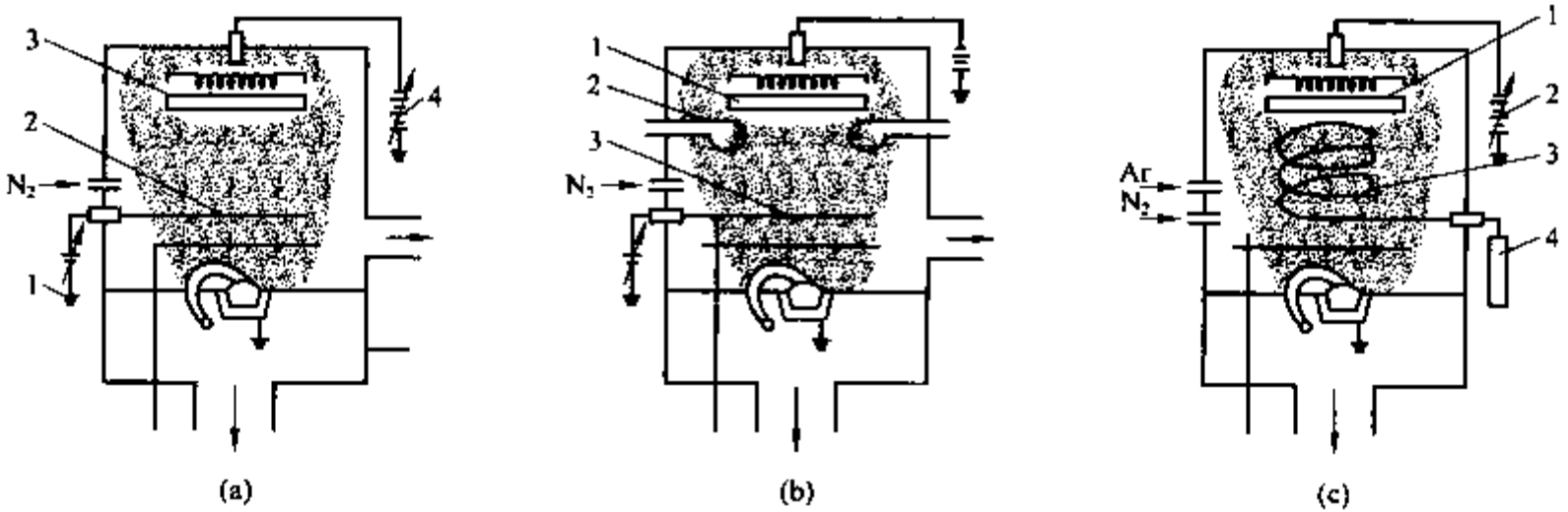
2. 离子镀的类型和装置

离子镀源物料粒子源于蒸发源和溅射源,为此可分蒸发源离子镀和溅射源离子镀。上述介绍的是蒸发源离子镀的一种,又按气体放电方式和基板负偏压高低分辉光放电型和弧光放电型离子镀两大类。

溅射型离子镀是采用高能  $Ar^+$  对源材料表面溅射产生金属原子,它们在气体放电空间电离成金属正离子,到达施加负偏压的基片(工件)沉积成膜。有磁控溅射、非平衡磁控溅射、中频交流磁控溅射和射频溅射离子镀四种形式。

1) 直流三极型离子镀(图 3-42a) 直流三极型离子镀是在镀膜过程中向真空室导入反应气,与源物料蒸气一起在等离子场中被电离、活化和产生化学反应,沉积出化合物膜,也称活性反应离子镀(AREIP)。与前述的直流二极型不同的是增加一个活化极,它设在基片与蒸发源之间的近蒸发源上方。对蒸发源带 20~80 V 直流正电位,起吸引电子轰击源物料激发的二次电子,增加基片和蒸发源空间的电子密度,提高电子与反应气和金属原子碰撞电离的几率,即增加金属离子离化率的和增加反应气体与源物质蒸发原子的活性,使在较低温度下能形成化合物的沉积。

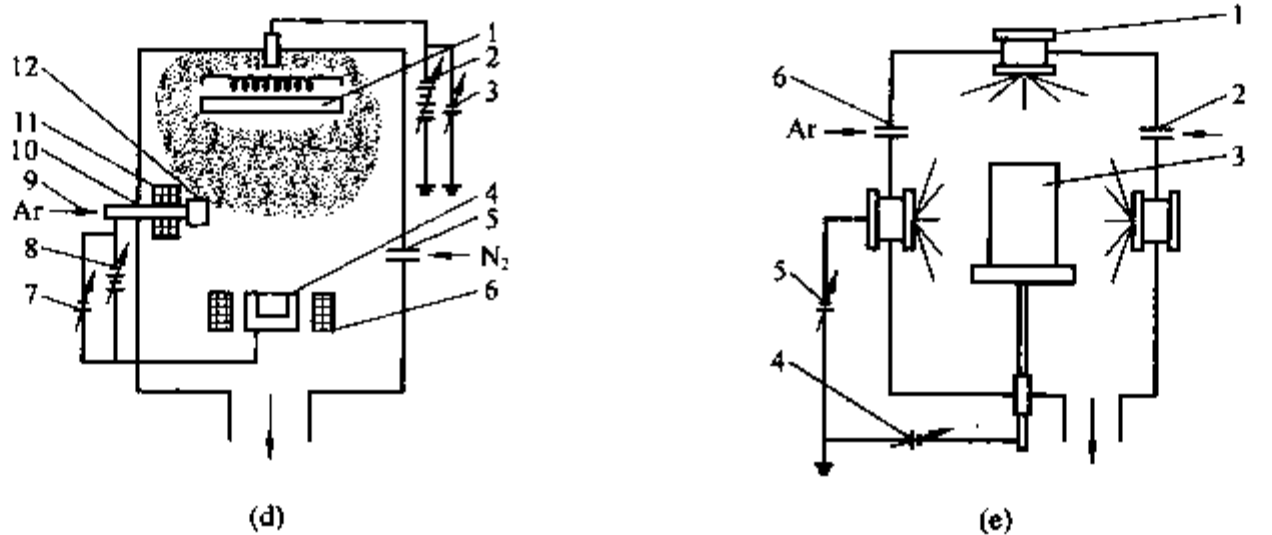
2) 热阴极离子镀(图 3-42b) 在 AREIP 基础上增设发射热电子的热阴极(增强型 ARE),增加电子数量,提高与气体粒子的碰撞几率,这样可降低基片与蒸发源间的辉光放电电压和放电时的气压。



1—活化极电源; 2—活化极; 3—基板;  
4—基板负偏压电源

1—基板; 2—热阴极;  
3—活化极

1—基板; 2—负偏压电源;  
3—感应圈; 4—高频电源



1—基板; 2—轰击负偏压电源; 3—镀膜基板负偏压电源; 4—坩埚; 5—反应气进气系统; 6—坩埚聚焦线圈; 7—主弧电源; 8—引弧电源; 9—氩气进气系统; 10—钨管; 11—第一聚焦线圈; 12—偏转磁场

1—阴极蒸发器; 2—反应气进气系统;  
3—基板; 4—基板偏压电源; 5—主弧电源;  
6—氩气进气系统

图 3-42 几种离子镀装置示意图

(a) 直流三极型离子镀; (b) 热阴极离子镀; (c) 射频离子镀; (d) 空心阴极离子镀; (e) 多弧离子镀



3) 射频离子镀(图 3-42c) 与直流二极型比较,在基片与蒸发源间增设射频铝丝感应圈,频率为 13.56 MHz,功率为 1.2 kW。电子在高频电场和直流场作用下,沿圆周作振荡运动,增加电子与反应气和蒸发原子的碰撞几率,提高离化率至 5%~15%。

4) 空心阴极离子镀(图 3-42d) 空心阴极离子镀装置有 90°和 45°偏转型空心阴极(Hollow Cathode Discharge, HCD)电子枪离子镀两种。90°的装置由水平放置的 HCD 枪、水冷铜坩埚、基板和真空系统组成。空心阴极电子枪是内径 3~15 mm,壁厚 0.5~3 mm,长度 60~80 mm 的 Ta 管,并收成小口保持氩气在管内有一定压强。Ta 管为阴极,开口端附近设辅助阳极,接数百伏直流电压引燃产生异常辉光放电,Ar 电离成  $Ar^+$ ,不断轰击 Ta 管表面,Ta 管温度上升至 2 300~2 400 K,Ta 管表面发射出大量热电子,辉光放电转变为弧光放电,电压降至 30~60 V,电流由毫安级上升到数十至数百安。接通阳极(坩埚)主弧电源(0~100 V),并切断引弧电源。在主弧电压电场作用下,等离子电子束经聚集、偏转后到达坩埚,使镀料金属蒸发。等离子电子束密度很高,与金属蒸气原子碰撞几率很高使之大量电离,在基板负偏压下沉积到工件表面成膜。在离子镀中通入反应气体,也可获得化合物膜。HCD 的离化率可达 20%~40%,绕镀性好,同时采用低压大电流作业,操作安全、简易。HCD 离子镀已广泛应用于装饰、刀具、模具、精密耐磨件等,尤在多品种小批量生产上有一定优势。

5) 多弧离子镀(图 3-43e) 利用阴极电弧放电,使靶材直接蒸发,在基板表面沉积成膜的离子镀方法。多弧离子镀装置,包括真空室、真空系统、蒸发器、基板、电源及进气系统等。蒸发器(靶)为阴极,基板为阳极,并接负偏压。蒸发器内装有靶材(镀物质)即为阴极。蒸发器的结构可引发电弧放电,并导致电子发射,电流密度很高,在阴极靶面分布不均匀和形成密集的弧斑,弧斑以每秒几十米的高速度无规则运动,产生的蒸气可支持弧光放电,形成等离子云,离子能量可达 100 eV,在负偏压下飞向基板沉积成牢固结合的膜。多弧离子镀可完成成分与靶材一致的多层结构膜、合金膜和化合物膜。主要适合高生产率的品种单一刀具。

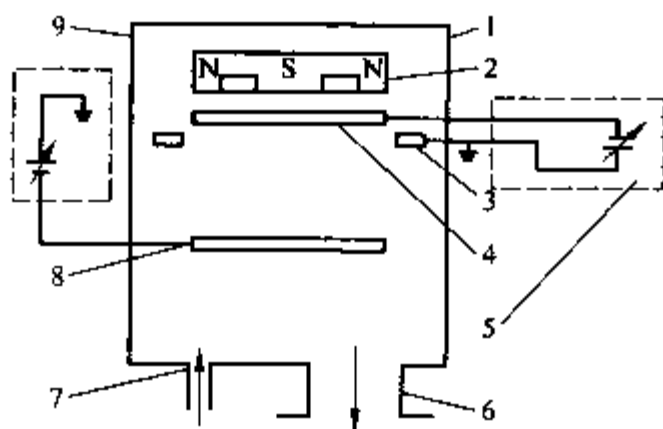


图 3-43 磁控溅射离子镀工作原理示意图

1—真空室；2—永久磁铁；3—磁控阳极；4—磁控靶；  
5—磁控电源；6—真空系统；7—Ar 气进气系统；  
8—基板；9—离子镀供电系统

支持弧光放电,形成等离子云,离子能量可达 100 eV,在负偏压下飞向基板沉积成牢固结合的膜。多弧离子镀可完成成分与靶材一致的多层结构膜、合金膜和化合物膜。主要适合高生产率的品种单一刀具。

6) 磁控溅射离子镀 是把磁控溅射和离子镀结合起来的技术。在同一装置内实现  $Ar^+$  对磁控靶(源物质)的稳定溅射和实现高能靶材离子向施加负偏压的基片进行轰击、溅射、注入及沉积。工作原理见图 3-43。真空室本底真空  $5 \times 10^{-3}$  Pa,注入 Ar 气保持  $1.33 \times (10^{-1} \sim 10^{-2})$  Pa。在 400~1 000 V 直流电压的辅助阳极和阴极磁控靶下,产生气体辉光放电。 $Ar^+$  在电场作用下轰击磁控阴极靶面,溅射出靶材原子。它在放电空间部分电离,在负偏压(0~3 000 V)的基片(工件)上与高能中性原子一起成膜。

世界上应用很多的是非平衡磁控溅射离子镀。磁控溅射靶阴极出现三种工作状态:① 普通磁控态 CM;② 非平衡磁控态 UM;③ 双向维持放电状态 DSSI。

### 三、化学气相沉积

化学气相沉积是通过气相物质在工件表面上进行化学反应,反应生成物在工件表面形成固态膜层的工艺方法。它采用含有成膜元素的物质达到沉积单晶、多晶或非晶的薄膜,如元素周期表上的 IV、IV-IV、III-V、II-VI 族、金属、电介质和超导薄膜等,应用于微电子、光电子等行业。产生气相沉积的化学反应须有一定的激活条件。投入实际应用的 CVD 方法有热激活型、金属有机物型(MOCVD)、光激活型(PCVD)、等离子体激活型(PECVD)和外延生长技术(ALE)等,这些方法的比较见表 3-85。按沉积化学反应温度分类,CVD 可分为低温沉积( $<200^\circ\text{C}$ ),如高频等离子激光 CVD 和微波等离子体 CVD;中温沉积(MTCVD,  $500 \sim 800^\circ\text{C}$ );高温沉积(HTCVD,  $900 \sim 1\,200^\circ\text{C}$ )和超高温沉积( $>1\,200^\circ\text{C}$ ),如 SiC 陶瓷沉积。一般的 CVD 过程在高温条件下进行。

化学气相沉积装置主要由下述单元组成:承载的反应室、工件载架、带控制的加热单元、气相供给单元、气相控制单元、泵单元和电气、计算机控制单元,如图 3-44 所示。对 PECVD 或 PCVD 应增加等离子体发生源或光源等。

表 3-85 几种 CVD 技术的比较

技术类型	激活方式	特点	气压(torr)	备注
热激活型	热	无机源材料	10 <sup>-5</sup> ~760	电阻、射频、红外辐照
MOCVD	热、辉光放电、超紫外辐射	金属有机源材料	10~760	常用于半导体、超导、电解质膜
PCVD	光	较低温度进行,可选区域	10~760	用光提高反应速率
PECVD	等离子体	较低温度进行	0.01~10	能在 350℃ 以下沉积,相对先进工艺方法
ALE <sup>①</sup>	热/光	单层可控	0.01~760	

注: ① Atomic Layer Epitaxy,以单原子层逐渐形成。用来沉积 II-VI 和 III-V 化合物材料,如半导体、氧化物、氮化物和硫化物。是一种特殊模式的分子束外延技术(MBE)。

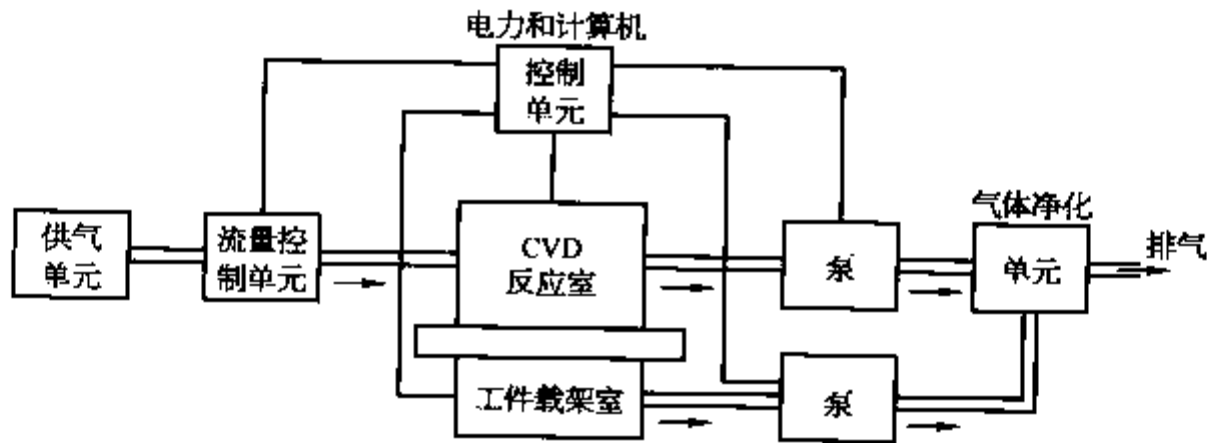


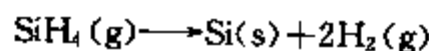
图 3-44 化学气相沉积装置组成框图

(一) CVD 中的化学反应

CVD 中的化学反应分如下 11 种。用于 CVD 反应中的化合物主要类型是金属和类金属的氢化物、卤化物、卤氢化物等无机化合物和有机金属化合物两种。

1. 热分解

热分解在普通 CVD 和 MOCVD 中指氢化物、碳基化合物和有机金属化合物的受热分解。例如单(甲)硅烷分解外延生长硅膜:

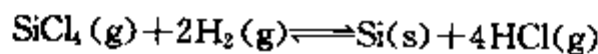


反应式中(g)、(s)表示气相和固相,反应不可逆。类似的氢化物有 GeH<sub>4</sub>、Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 和 ZrH<sub>4</sub> 等。

2. 还原反应

卤化物比氢化物稳定性高,易于提纯,应用 H<sub>2</sub> 还原可降低反应温度,相应比分解过程更为价廉。在微电子和硬质涂层上必须应用还原反应。但缺点是还原要求相对较高的温度。

Si 的均匀外延生长主要应用 H<sub>2</sub> 作还原剂和载气,反应式为:

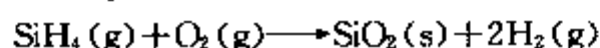
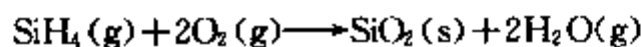


反应式正方向进行是沉积,反方向进行是腐蚀,因此可以改变反应平衡条件使在沉积前先行洁净工作,这在外延生长中更为重要。

3. 氧化反应

氧化反应的反应气组分是金属氢化物、卤化物、卤氢化物和金属有机化合物,沉积中加入氧或氧化剂(如 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NO、NO<sub>2</sub> 或 O<sub>3</sub>),形成氧化物薄膜。一般小于 500℃ 时应用氧气,大于 500℃ 时还需加入 CO<sub>2</sub> 或氮的氧化物。氧化反应有的为吸热,有的为放热。氧化反应常用于沉积非晶电介质膜(如 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 或 TiO<sub>2</sub> 等)、硅酸盐玻璃(SiO<sub>2</sub>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、SiO<sub>2</sub>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、半导体(ZnO)、导体(SnO<sub>2</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 或磁性膜。

典型实例为沉积 SiO<sub>2</sub> 膜(取决于压力、温度和载气条件):



#### 4. 水解反应

水解反应是气相化合物与外加的或反应过程中形成的水蒸气发生反应来沉积氧化膜。当应用  $\text{CO}_2 + \text{H}_2$ 、 $\text{H}_2 + \text{O}_2$  或  $\text{NO} + \text{H}_2$  时,水在水解过程中形成。因为水解反应速度快,应在近基片(工件)区进行混合。它常用于涂覆非晶膜和外延生长膜。

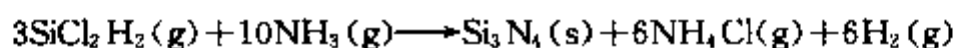
典型的沉积  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的反应式为:



#### 5. 氮化反应

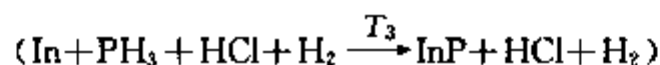
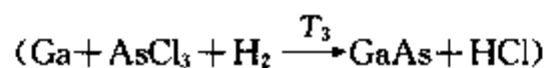
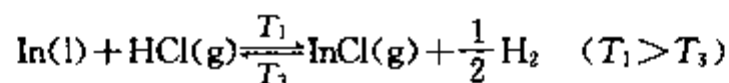
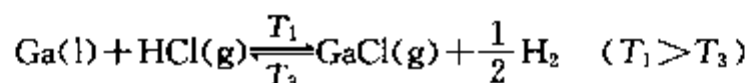
氮化反应是气相化合物与氨、氮、联氨或别的含氮化合物发生反应来沉积氮化膜。常用于沉积  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、氮氧化物( $\text{Si}_2\text{O}_3\text{N}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{N}_2$ )、半导体化合物(BN、AlN 和 GaN)、金属氮化物(TaN、TiN)和超导氮化物(NbN)薄膜。

典型实例是沉积  $\text{Si}_3\text{N}_4$ (应用二氯甲硅烷和  $\text{NH}_3$ ),这是在大气压或低压条件下重要的工业 LPCVD 过程:



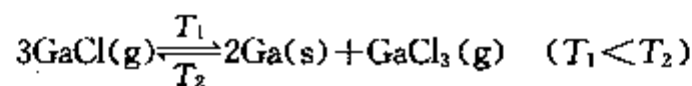
#### 6. 化学传输反应

化学传输反应是应用一种传递剂和一种无挥发性的固体源物质形成具有挥发性的物料,在系统容器中另一部位的基片(工件)上沉积成膜。GaAs 和 InP 的外延生长是应用 HCl,按下列反应将液相源传输至温度较低的部位沉积,沉积的情况见括号中的后两式:



#### 7. 歧化反应

歧化反应是一种反应物由于在较低的温度下的不稳定性,形成较高化合价组元的高稳定生成物并沉积成膜。典型实例是 GaCl 经过歧化反应获得高稳定的  $\text{GaCl}_3$  和固相 Ga,该反应式可用于 GaAs 膜的沉积:



GaCl 在较高的温度  $T_2$  时会可逆产生。GaAs 膜的沉积要在存在不同温区的热壁室 CVD 系统中进行。相应设备较复杂和易产生污染是这种方法的缺点。

#### 8. 催化

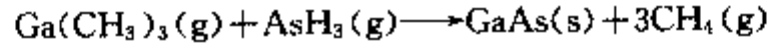
应用催化剂可以提高化学反应的速度。对  $\text{WF}_6$  的氢还原反应, $\text{H}_2$  必须分解,当在金属 W 或 Si 的表面, $\text{H}_2$  的分解受到催化:



$\text{AsH}_3$  和  $\text{PH}_3$  是沉积 III-V 族化合物膜的重要反应物,它们的热分解在出现相同氢化物阴离子的晶体材料时受到催化。如  $\text{AsH}_3$  的完全分解温度在出现 GaAs 时可由  $750^\circ\text{C}$  降低至  $550^\circ\text{C}$ 。

#### 9. 合成反应

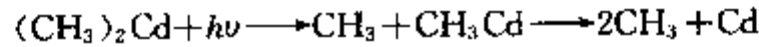
合成反应是两种或多种气相反应物合成获得固相薄膜。在 MOCVD 中,许多 III-V 和 II-VI 族元素薄膜由金属有机化合物和氢化物合成。典型实例为:



### 10. 光解反应

光解反应是通过吸收紫外光使反应物发生分解并获得沉积膜,常应用金属的羰基化合物、烷基化合物、氢化物和卤化物来沉积金属和半导体膜。

LCVD 中最简单的是一个光子的吸收—分解反应:

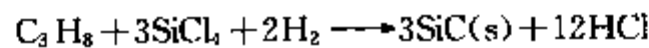


其中,第一步是金属有机化合物受光子辐照的分解,其激活能为 46 kcal/mole,第二步的激活能为 21 kcal/mole,依靠热激活分解,获得 Cd 原子,扩散沉积成膜。

### 11. 组合反应

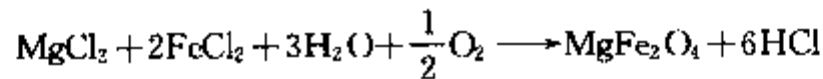
分以下四组:

(1) 热分解+还原反应组合:沉积 SiC 膜的反应式为

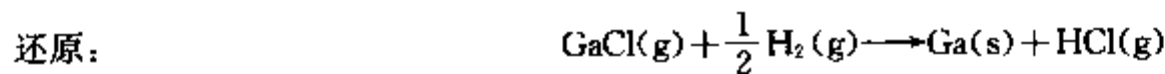


(2) 氧化和氮化反应组合:沉积氧氮化膜。

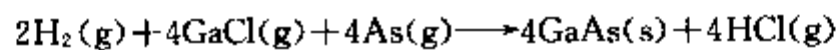
(3) 氧化和水解反应组合: MgFe 氧化物的外延生长沉积反应式为



(4) 热分解、化学传输和还原反应组合:应用卤化物和氢化物获得许多 III-V 和 II-VI 族元素的化合物膜。以 GaAs 膜为例:



同时,在 As 蒸气下,GaAs 膜发生沉积,其总反应式表示为:



### (二) CVD 常用的硬质涂层方法

硬质涂层主要用于机械工业,如用于耐磨损的机械零部件、金属切削刀具、模具等。硬质涂层中除了金刚石膜外,一般都为化合物。它们按化学键分有金属键、共价键和离子键三类。一些硬质涂层的物理性能见表 3-86。本节主要介绍常用的 TiC、TiN 和 TiCN 三种。

表 3-86 各种硬质涂层的物理性能

类型	名称	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	熔点 (°C)	硬度 HV 或 HK	弹性模量 (E/GPa)	起始氧化 温度(°C)	热导率 [W/(m·K)]	热胀系数 (×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
金属键型	TiC	4.39	3 067	2 800~3 200	320~470	1 100	16.75~25.12	8.0~8.6
	TiN	5.40	2 950	2 100	300~620	1 100	20.93~29.31	9.4
	ZrC	6.63	3 445	2 560	410	—	—	7.0~7.4
	ZrN	7.32	2 982	1 600	520	—	—	7.2
	VC	5.41	2 648	2 900	440	—	—	7.3
	VN	6.11	2 177	1 560	470	—	—	9.2
	CrN	6.12	1 050	1 100	410	—	—	—
	WC	15.72	2 776	2 000~2 350	730	500~800	29.31	3.8~3.9

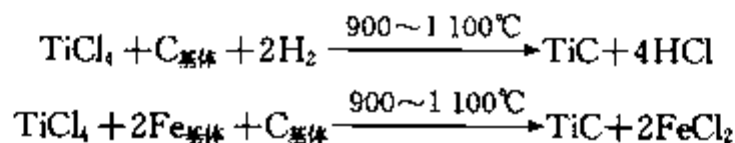
(续表)

类型	名称	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	熔点 (°C)	硬度 HV 或 HK	弹性模量 (E/GPa)	起始氧化 温度(°C)	热导率 [W/(m·K)]	热胀系数 (×10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )
共价键型	B <sub>4</sub> C	2.52	2 450	3 000~4 000	450	—	—	4.5(5.6)
	CBN	3.48	2 970~3 227	≈5 000	670	1 360	1 297.91	4.8
	金刚石	3.52	3 800	8 000~10 000	930	600	2 038.97	1.2~4.5
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3.19	1 900(分解)	1 720	290	1 300	16.75~25.12	2.5
	AlN	3.26	2 250	1 230	360	—	—	5.7
离子键型	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.98	2 047	2 300~2 700	400	稳定	29.31	8.4
	TiO <sub>2</sub>	4.25	1 867	1 100	210	—	—	9.0
	ZrO <sub>2</sub>	5.76	2 677	1 200	190	稳定	1.88	11(7.6)

## 1. 沉积化学反应

对 TiC、TiN 和 TiCN 三种硬质膜沉积应用的反应气和反应式见表 3-87。

注意: TiCl<sub>4</sub> (蒸发温度为 20°C) 还会与钢铁工件中的 C 和 Fe 起反应:



实际上,在沉积初期,钢件基体中的碳起重要作用,能加速 TiC 膜形成。钢中碳含量要求达 0.5%~0.8% 以上。另外,因为 TiN 要在 TiC 及氮化物组成的薄膜上才能沉积,反应开始阶段钢件基体中的碳扩散至表面形成 TiC,所以会出现一定的脱碳(贫碳)区。表 3-87 中第四项是在 700~900°C 的中温沉积,反应气发生分解、化合反应,是一种生成 TiCN 的新方法,与高温沉积方法制配的 TiCN 相比,涂层结构致密,残留应力较小,呈柱状晶,具更高的抗磨损性、抗热振性和韧度,更适合高速切削和干切削使用场合下应用。

表 3-87 三种硬质膜应用的反应气和反应方程式

涂层	反应气	沉积反应方程式
TiC	TiCl <sub>4</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub>	$\text{TiCl}_4 + \text{CH}_4 + \text{H}_2 \xrightarrow[\text{H}_2]{900\sim 1100^\circ\text{C}} \text{TiC} + \text{H}_2 + 4\text{HCl}$
TiN	TiCl <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	$\text{TiCl}_4 + 2\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{N}_2 \xrightarrow[\text{H}_2]{850\sim 1000^\circ\text{C}} \text{TiN} + 4\text{HCl}$
TiCN	TiCl <sub>4</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	$2\text{TiCl}_4 + 2\text{CH}_4 + \text{N}_2 \xrightarrow[\text{H}_2]{900\sim 1100^\circ\text{C}} 2\text{TiCN} + 8\text{HCl}$
TiC+TiN	CH <sub>3</sub> CN, H <sub>2</sub> , TiCl <sub>4</sub>	$2\text{TiCl}_4 + \text{CH}_3\text{CN} + 4\frac{1}{2}\text{H}_2 \xrightarrow{700\sim 900^\circ\text{C}} \text{TiC} + \text{TiN} + \text{CH}_4 + 8\text{HCl}$
	(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N, H <sub>2</sub> , TiCl <sub>4</sub>	$2\text{TiCl}_4 + (\text{CH}_3)_3\text{N} + \frac{1}{2}\text{H}_2 \xrightarrow{700\sim 900^\circ\text{C}} \text{TiC} + \text{TiN} + 2\text{CH}_3\text{Cl} + 6\text{HCl}$
	CH <sub>3</sub> (NH) <sub>2</sub> CH <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> , TiCl <sub>4</sub>	$4\text{TiCl}_4 + \text{CH}_3(\text{NH})_2\text{CH}_3 + 4\text{H}_2 \xrightarrow{700\sim 900^\circ\text{C}} 2\text{TiC} + 2\text{TiN} + 16\text{HCl}$
	HCN, H <sub>2</sub> , TiCl <sub>4</sub>	$2\text{TiCl}_4 + \text{HCN} + 3\frac{1}{2}\text{H}_2 \xrightarrow{700\sim 900^\circ\text{C}} \text{TiC} + \text{TiN} + 8\text{HCl}$

## 2. 沉积工艺参数

TiC、TiN 和 TiCN 三种硬质膜的沉积工艺参数实例见表 3-88。

表 3-88 三种硬膜沉积工艺参数实例

工艺参数	TiC(高温 CVD)	TiN(高温 CVD)	TiCN(中温 CVD)
沉积温度(°C)	1 000~1 050	950~1 050	700~900
沉积压力(Pa)	$(1\sim2)\times 10^4$	$(1\sim2)\times 10^4$	$2\times 10^3\sim 2\times 10^4$
沉积时间(min)	60~180	60~180	60~240
气体流量 (mL/min)	主 H <sub>2</sub> : 7 000~12 000 CH <sub>4</sub> : 4 000~8 000 TiCl <sub>4</sub> 加热温度 45~65°C 载气 H <sub>2</sub> : 4 000~6 000	主 H <sub>2</sub> : 8 000~13 000 N <sub>2</sub> : 5 000~10 000 TiCl <sub>4</sub> 加热温度 45~65°C 载气 H <sub>2</sub> : 5 000~9 000	CH <sub>3</sub> CN : TiCl <sub>4</sub> : H <sub>2</sub> =0.01 : 0.02 : 1(摩尔比)

### (三) 其他方法

#### 1. 等离子体增强化学气相沉积(PECVD)

PECVD 技术的主要优点: ① 沉积温度低于 600°C, 拓宽了适用基体材料的范围; ② 工件变形小; ③ 绕镀性好, 涂层均匀; ④ 调制成分方便; ⑤ 比 PVD 设备简单。其种类有直流、脉冲直流、射频、微波和弧光 PECVD 等多种, 相应的工艺及特点见表 3-89。

表 3-89 几种 PECVD 技术的工艺及特点

类型	形成等离子体的能源	工艺参数	特点	沉积涂层举例
直流 PECVD	直流 0~4 kV 工件接直流负高压 真空室接正极 外设加热系统	沉积温度 300~600°C 直流电流 16~49 A/m <sup>2</sup> 真空度 $1\times 10^{-2}\sim 200$ Pa 沉积速率 2~3 μm/h	工件接直流负高压, 沉积温度降低, 涂层均匀一致, 膜基结合良好, 不适合非金属基体	TiC、TiN、TiCN
直流脉冲 PECVD	大功率逆变式脉冲直流电源 频率 5~30 kHz 可调 输出脉冲电压 0~1 600 V 可调 外设加热系统	沉积温度 300~600°C 等离子电压 0~1 kV 脉冲持续时间 4~1 000 μs 脉冲断续时间 10~1 000 μs $n < 4 096$ 个负脉冲后出现正脉冲, 持续时间 4~1 000 μs	具更大优越性, 热加工工艺参数可独立控制, 灭弧能力强, 工件不易烧损, 涂层均匀一致, 设备相对简单, 适于工业生产	TiN、TiCN、 纳米 TiN/α-Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 、 金刚石等
射频 PECVD	射频 450 kHz 或 13.56 MHz 或射频加直流电源 0~2 kV	沉积温度 300~500°C 射频功率 500 W 沉积速率 1~3 μm/h 反应室压力 0.13 Pa	沉积温度较低, 可大面积成膜, 适合大批量生产, 可沉积绝缘膜, 涂层质量好, 重复性好, 设备简单	TiN、TiC、TiCN、 β-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 等
微波 PECVD	微波 2 450 MHz 无电极放电	微波 2 450 MHz 振荡功率几百至 1 kW 以上 沉积速率 2~3 μm/h	微波等离子体密度高, 反应气体活化程度高, 进一步降低反应温度, 室温下可沉积 Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , 可获不同气压下的微波等离子体, 涂层质量好, 设备复杂, 造价高	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 、β-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 、 金刚石、立方 BN、 聚合物薄膜等
弧光 PECVD		热丝弧光放电 由弧柱电离气体	等离子体密度大, 有磁场搅拌功能	DLC 等

PECVD 技术的主要工作机理: 在沉积室内建立高压电场, 反应气体发生辉光放电情况下被激发成活泼的分子、原子、离子和原子团形成等离子体, 依靠等离子体加速化学反应过程, 降低了沉积反应温度, 提高了沉积速率。

#### 2. 激光化学气相沉积(LCVD)

LCVD 是利用激光束光子的能量激发和促进化学反应的 CVD 技术。LCVD 设备一般是在 CVD 装置上增

加激光器、导光聚焦系统和激光功率控制系统等。激光器采用  $\text{CO}_2$  激光器、YAG 激光器、 $\text{Ar}^+$  激光器和准分子激光器几种。按激光作用机制,LCVD 分激光热解和激光光解两种。

LCVD 具有独特特性,可以局部加热选区沉积,降低沉积温度(基体保持  $200^\circ\text{C}$ ),膜层成分灵活,可形成高纯膜、多层膜,沉积速率高等。

激光热解和激光光解 LCVD 机制的示意图见图 3-45。前者选用的激光波长对反应物是透明的,不被吸收,基体是吸收体,形成局部加热点,有利于该点的沉积。后者的反应物气相对激光有高吸收率,光子激发化学反应,在室温下可进行沉积,但速率慢。

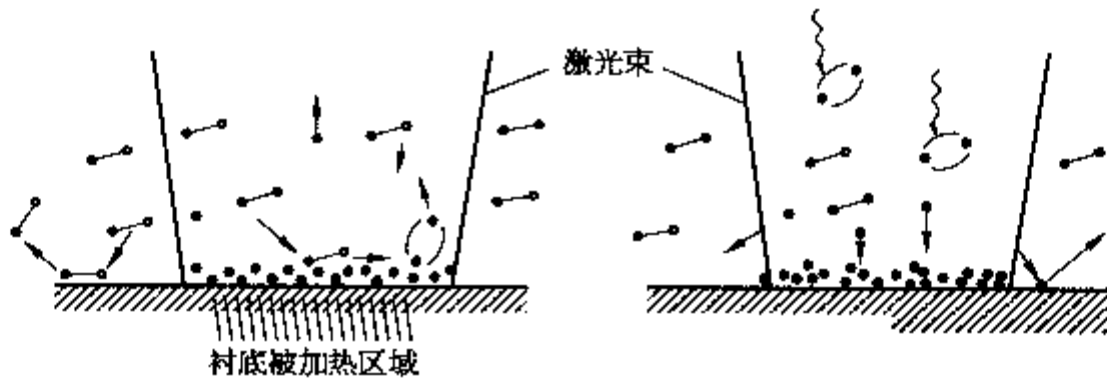


图 3-45 激光热解和激光光解化学气相沉积机制示意图

### 3. 金属有机物化学气相沉积(MOCVD)和分子束外延成膜技术(MBE)

MOCVD 和 MBE 能沉积二元、三元和四元薄膜,如  $\text{GaAs}$ ,  $\text{InP}$ ;  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ ,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ,  $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ ;  $\text{GaInAsP}$  等。下面以沉积 III-V 族化合物薄膜为例对 MOCVD 和 MBE 进行简单介绍。

图 3-46 是  $\text{GaInAs}$  在  $\text{InP}$  上沉积的分子束外延生长装置示意图。Ga 和 In 源放于两只舟中,相互隔开以防其他化合物进入和不必要的扩散,并分别通入  $\text{HCl}$  和  $\text{H}_2$ 。位于混合区的旁路通入  $\text{AsH}_3$ 、 $\text{PH}_3$  和掺杂气体。 $\text{GaInAs}$  是在大气压下进行沉积,而  $\text{InP}$  是在还原气氛压力下生长的。

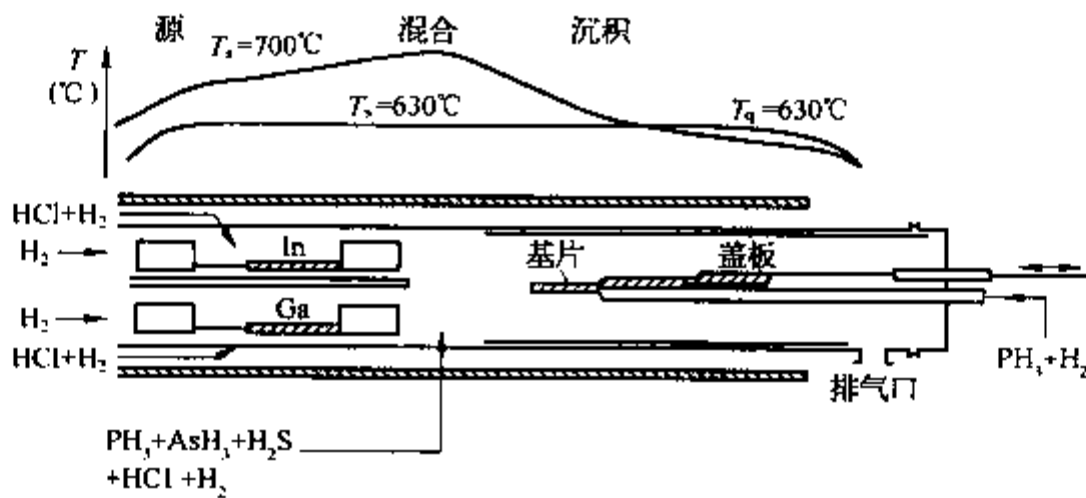


图 3-46  $\text{GaInAs}$  在  $\text{InP}$  上沉积的分子束外延生长装置示意图

分子束外延生长是在非平衡条件下完成,在超真空下以干式方法进行,生长温度低( $\text{GaAs}$  在  $500\sim 600^\circ\text{C}$ );膜生长速度可加以控制;可得到大面积的、具均匀性和重复性的膜层,沉积易于控制和反馈。它是生长超薄膜层材料的高新技术,包括沉积异质结、超晶格、量子阱、量子线、量子点结构等半导体微结构材料,可进一步推动半导体领域、信息领域、低维材料和纳米材料领域的技术发展。

## 四、气相沉积技术的应用和发展

材料表面工程技术是一门多学科互相交叉渗透的边缘学科。它综合采用了电子技术、真空技术、冶金、物理、化学和材料学的最新技术和理论基础,对材料整体进行优良的热处理,同时对材料表面施行优良的改性获得优异的性能,提高机械或器件的使用寿命。

PVD 和 CVD 的先进技术在硬质涂层上的应用一直是人们最感兴趣的方面。对高速钢刀具采用 PVD 沉积  $\text{TiN}$  薄层,使刀具表面硬度由  $920\text{ HV}$  提高到  $2000\text{ HV}$ ,从而提高寿命  $2\sim 20$  倍。这种飞跃促使人们去探求

更好的表面强化方法。在现代切削加工中,为了对淬硬材料实现高速切削和满足难加工材料(如高锰钢、奥氏体不锈钢、耐磨铸铁、铝硅合金、钛合金和镍基合金等)的切削要求,刀具材料组成发生了很大改变。1998年与2005年刀具材料变化可见表3-90,PVD涂层刀具比例提高较多。

表3-90 1998年与2005年刀具材料组成情况比较

年份	未涂层 硬质合金	CVD涂层 硬质合金	PVD涂层 硬质合金	氧化铝 陶瓷	氮化硅 陶瓷	金属 陶瓷	CBN	金刚石	金刚石 涂层
1998	25%	42%	10%	4%	4%	10%	2%	2.8%	0.2%
2005	17%	38%	15%	4%	4%	11%	5%	5%	>1%

### (一) 气相沉积硬质涂层

涂层工具的生产和应用非常广泛。到2005年,我国涂层硬质合金刀具产量约占总产量的25%以上。高速钢刀具生产约达30亿元,涂层刀具产值可达2.5~3亿元左右,即占10%左右,这一比例还会有提高。

世界上主要硬质合金工具公司生产的硬质合金工具应用CVD技术的约占80%以上,对涂层高速钢工具应用PVD和PECVD技术,刀具应用的重涂层比例达20%左右。

推荐的不同用途刀具的涂层材料见表3-91。

表3-91 推荐的不同用途刀具的涂层材料

被加工材料	钻 削	车 削	铣 削	螺 纹	铰 削	拉 削	滚 削	插 齿
模具钢、 不锈钢	TiN AlTiN-DLC	TiN AlTiN	TiN TiCN AlTiN	TiCN AlTiN-DLC	AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC	TiN TiCN AlTiN	TiN TiCN AlTiN
钢 (45~ 65 HRC)	AlTiN	AlTiN	AlTiN	AlTiN- DLC	AlTiN AlTiN-DLC	AlTiN	TiN TiCN AlTiN	AlTiN
铸 铁	TiN AlTiN	TiN AlTiN	TiN AlTiN	TiN TiCN AlTiN-DLC	AlTiN	CrN AlTiN-DLC	TiN TiCN AlTiN	CrN AlTiN-DLC
钛、铝、镁、 镍等合金	AlTiN AlTiN-DLC	AlTiN AlTiN-DLC	AlTiN AlTiN-DLC	AlTiN AlTiN-DLC	AlTiN AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC
黄铜、青铜、 镍、银	CrN AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC	CrN AlTiN-DLC

#### 1. 金属键型硬质涂层

这类涂层基本上是IV A、V A和VI A过渡族金属的碳化物、氮化物、碳氮化合物或硼化物。

Ti熔点1820℃,电阻率为 $43 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ 。其中,TiN是第一代工业化应用最为广泛的硬质涂层材料,有人称之为金属陶瓷,实际上属金属键结合的间隙相,其主要物理性能可见表3-86。TiN具金黄色彩,摩擦因数较低,抗冲击韧性好,与被加工材料亲合力小,不易形成切削瘤引起粘着磨损。

TiC具较高抗磨粒磨损能力,尤为可贵的是其膨胀系数与硬质合金相近,膜基易结合牢固,适于作硬质合金刀具的涂层或多层涂膜的底层。

ZrN具一定抗氧化能力,化学稳定性好,应用较广泛。

CrN具很强的耐蚀和抗氧化能力,附着力较高,常用于制备超硬复合涂层,应用于Ti合金等难加工材料的切削。

#### 2. 多元复合涂层和多层复合涂层

TiCN、TiAlN、TiBN、TiAlVN是多元硬质涂层,与TiN相比,有更高的涂层硬度和更好的抗高温氧化性、热硬性和耐蚀性。TiCN调整C/N比例,可调整性能,硬度有提高,可获得从金黄到蓝紫直至黑色的涂层。多



元复合涂层还有降低涂层内应力、提高韧性、阻止裂纹扩展等特性。TiAlN 具有 2 800 HV 的硬度, Al 的加入提高了其抗高温氧化的能力, 工作温度可达 800℃, 适合于高速切削、干切削和难加工材料的切削。TiBN 由于 B 的加入, 使 TiN 晶格增大和产生畸变, 增加涂层成核数量而细化组织, 且与氧的亲合力强, 使其室温硬度、高温热硬性和抗氧化性得到提高。

AlCrN 的硬度可达 3 200 HV, 起始氧化温度达 1 100℃, 其韧性比 TiAlN 好, 更适用于铣削、滚削的断续切削加工。AlCrSiN 具超强抗氧化和高温下的低摩擦因数。TiBON 也具高温下的低摩擦因数, 适用于铝和不锈钢等易粘刃材料的切削加工。

多层复合涂层是将上述各种涂层材料有机组合, 得到 TiC-TiN、TiC-TiCN-TiN、TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN、TiC-TiCN-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN、TiC-TiBN-TiN、TiAlN-MoS<sub>2</sub>-TiAlN-WC/C 等多层复合硬质涂层。这样能充分发挥单层涂层的优点, 综合结果会大大提高涂层刀具的切削性能和使用寿命。

### 3. 纳米复合涂层和纳米晶-非晶复合涂层

纳米级材料具有独特的量子尺寸效应、体积效应和表面效应, 会使材料的性能发生惊人的改变。纳米复合涂层就是使纳米级厚度的多种涂层交互重叠而获得。如厚度只有 1~2 nm 的 TiN 和 AlN 重叠 2 000 层, 硬度可达到 4 500 HV, 提高膜基结合强度, 将抗高温磨损能力和高温氧化能力极大地提高, 使用寿命将比普通涂层刀具提高 3 倍以上。

将纳米级尺度晶粒的过渡金属氮化物嵌入另一种非晶体材料中获得纳米晶-非晶复合涂层, 可获得大于 40 GPa 的超高硬度, 使用前景广阔。嵌入的第二相有硬质相和软质相两种, 如 TiN 的硬质相和 Cu、Ni 等软质相。

另外, 共价键和离子键超硬度涂层中除表 3-86 中列出的外, 引人注目的还有类金刚石(DLC)和 β-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>。

## (二) CVD 涂层工具钢的热处理

一般 CVD 涂覆的温度较高, 如低压 CVD 中的高温 CVD 沉积温度达 900~1 200℃, 为了使 CVD 涂覆的工具钢部件具有优异的性能, 不仅要求涂层的性能优良, 同时也要求基材具有优良的支承能力, 即对其相应要求的最低硬度应达 58 HRC。

对硬质合金母材, 经 CVD 涂覆后的性能很少受影响, 所以应用最为广泛。对尺寸较厚实的高合金工具钢部件, 经 CVD 涂覆后应进行后热处理实现基材的强化。对尺寸较细的工具(如钻头等), 由于受后热处理的变形限制, 一般只采用 PVD 处理。

### 1. CVD 涂层工具钢类型

CVD 涂层工具钢应满足下述要求: ① 高淬透性; ② 具有二次硬化能力; ③ 奥氏体化加热温度较接近 CVD 涂覆温度。

表 3-92 列出 CVD 涂层工具钢的种类, 主要为高合金钢和高速钢。

表 3-92 CVD 涂层工具钢的类型和钢号

类型	Mo 高速钢	W 高速钢	热模钢	冷模钢	空淬钢	油淬钢	低合金工具钢
AISI	M2 (M3PM)	T5	H13	D2, D3	A2	O2	L3
DIN	HS 6-5-2 (HS6-5-3) PM	HS18-1-2-10	X40CrMoV5-1	X155CrVMo12-1 X210Cr12	X100CrMoV5-1	90MnCrV8	100Cr6
	1.334.3	1.326.5	1.234.4	1.237.9, 1.208.0	1.236.3	1.284.2	1.206.7
GB	W6Mo5Cr4V2	W18Cr4VCo5	4Cr5MoSiV1	Cr12MoV, Cr12	Cr5Mo1V	9Mn2V	Cr2

经 CVD 处理后材料的冷却比较缓慢, 对为此获得低硬度的基体应通过后热处理进行(淬火+回火)的强化。

### 2. CVD 涂层工具钢热处理的方法和要求

图 3-47 表示工具钢 CVD 涂覆前后进行热处理的四种方法, 对其复杂程度、基体硬度等五方面的对比情

况及对 L3 和 D2 钢的适用方法见表 3-93 中。

CVD 涂层工具钢涂覆前后的热处理要求：

- (1) 采用真空或保护气氛进行；
- (2) 热处理前进行预热，淬火过程中要均衡冷却；
- (3) 应用气淬、油淬或空淬的马氏体分级淬火方法；
- (4) 由钢材决定回火温度和次数；
- (5) 采用合适的装料夹具，尽量减小 CVD 和热处理中的工件变形。

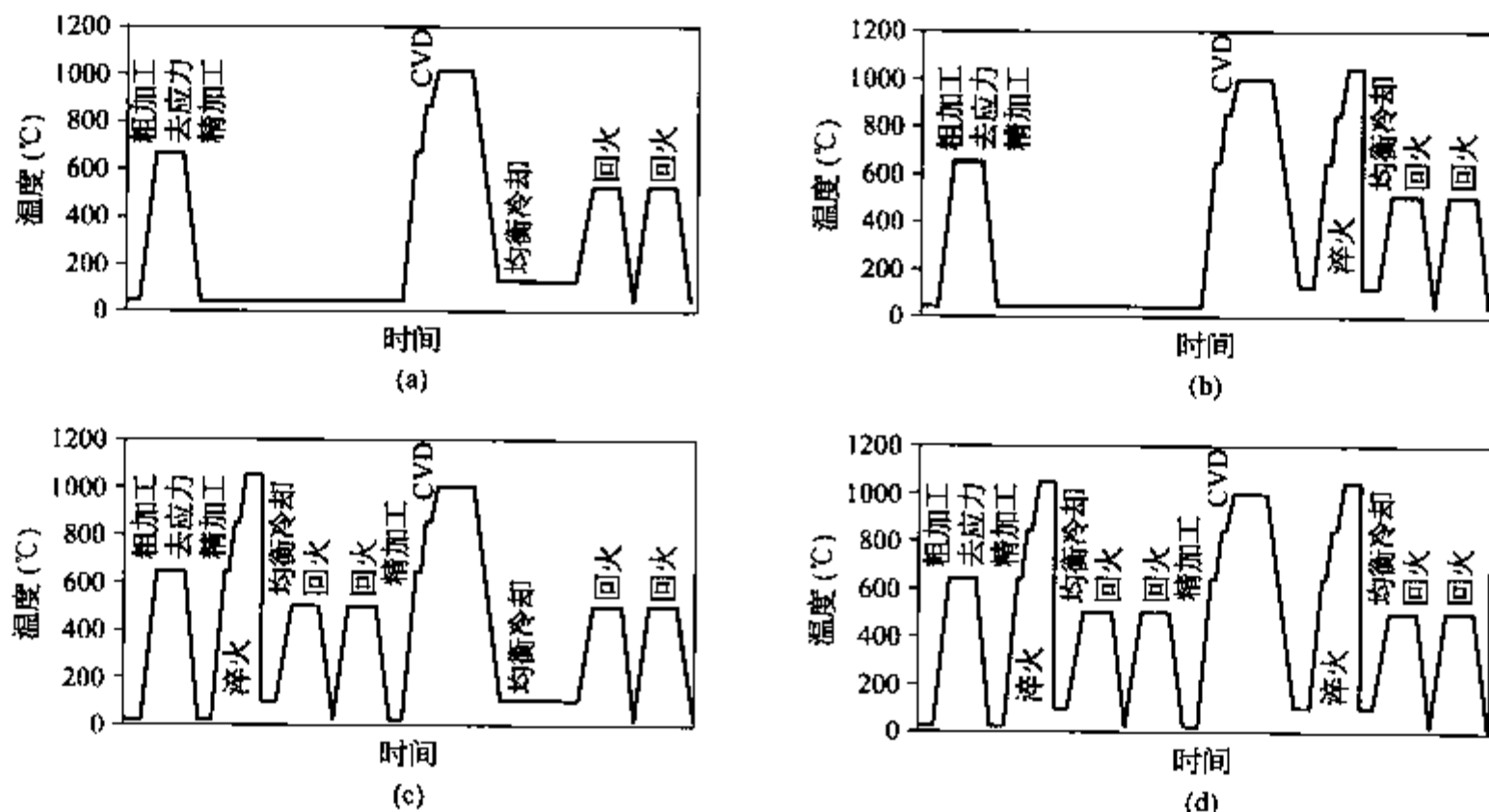


图 3-47 工具钢 CVD 涂覆前后进行的热处理方法

表 3-93 CVD 前后热处理方法的比较

热处理方法	复杂程度	基体强度	晶界部位 碳化物析出	二次硬化	变形程度	适用钢举例
(a)	低	稍有降低	有	稍差	稍有变形	D2
(b)	中	增加	无	好	稍有变形	D2
(c)	中	稍有降低	有	稍差	很少	D2
(d)	高	增加	无	好	很少	L3

### 3. 应用实例

D2 钢和 L3 钢经 CVD TiN 涂覆前后热处理工序见表 3-94。

表 3-94 D2 和 L3 在 CVD TiN 涂覆前后热处理工序举例

钢种	机加工/热处理工序			
D2	淬火+回火 1 050℃, 20 min 油冷 +(500℃, 1.5 h)×3	机加工	CVD TiN 1 000℃, 2.5 h 炉冷	淬火+回火 真空 1 050℃, 20 min 油冷+(500℃, 1.5 h)×3 或真空 1 050℃, 20 min 0.6 MPa 气淬(真空 500℃, 1.5 h)×3
L3	淬火+回火 830℃, 20 min 油冷 180℃, 2 h	机加工	CVD TiN 1 000℃, 2.5 h 炉冷	淬火+回火 真空 830℃, 20 min 油冷 空气 180℃, 2 h

## 第四章 感应热处理

感应淬火是最常用的表面加热淬火方法,具有工艺简单、工件的畸变量小、生产效率高、节能、环境污染小、工艺过程易于实现机械化和自动化等优点。感应加热的频率分为工频、中频、超音频、高频和超高频,各种频率的范围和加热的功率密度见表 4-1。

表 4-1 感应加热方法分类

加热方法	频率(kHz)	功率密度( $\times 10^2$ W/cm <sup>2</sup> )	加热方法	频率(kHz)	功率密度( $\times 10^2$ W/cm <sup>2</sup> )
工 频	50 Hz	0.1~1	高频、超音频	10~1 000	2~10
中 频	1~10	<5	超高频脉冲	27 120	100~300

### 第一节 感应加热原理

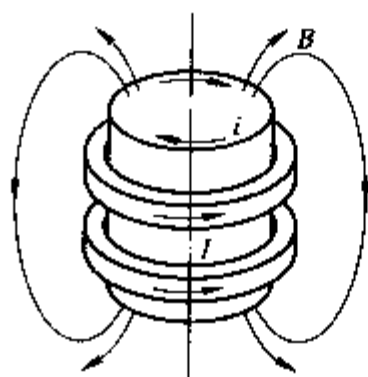


图 4-1 工件在交变磁场中产生涡流

感应加热主要基于电磁感应、表面效应和热传导这三项基本原理。

#### 一、电磁感应

当交变电流  $I$  通过线圈时,它的内部和周围将形成交变磁场,置于线圈内部的导体便被交变磁场的磁力线所切割,于是在该导体上产生感应电动势,并产生涡流和热量,这一现象称为电磁感应,如图 4-1 所示。

#### 二、表面效应(集肤效应)

当交变电流  $I$  通过导体时,在它形成的交变磁场作用下,导体内会产生感应电动势。由于越近中心的感应电动势越大,导体中心的电流便趋向表面,电流从表面向中心呈指数规律衰减,如图 4-2 所示。这种现象称为表面效应或集肤效应。

表面效应使工件中涡流也集中在表面,随着透入深度  $\Delta$  的增加,涡流强度及产生的热量按指数规律急剧下降,如图 4-3 所示。感应加热中以表面处的涡流强度值的  $1/e$ (约 36.79%) 处的深度作为涡流透入深度,可按下式计算:

$$\Delta = 56.4 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (\text{mm})$$

式中  $\rho$ ——导体的电阻率( $\Omega \cdot \text{cm}$ );  
 $\mu$ ——导体的磁导率(H/m);  
 $f$ ——电流频率(Hz)。

钢铁材料在加热过程中, $\rho$  随温度升高而增大(在  $800 \sim 900^\circ\text{C}$  范围内多种钢材的  $\rho$  值基本相同);在失磁点(居里点)以下, $\mu$  值基本不变,但到达失磁点时,突然降为真空的磁导率( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m),因此,当温度到达失磁点时,涡流透入深度显著增大。超过失磁点的涡流透入深度称为热态涡流透入深度,反之称为冷态涡流透入深

度。显然,前者比后者大许多倍,如图 4-4 所示。因此在快速加热条件下,即使向工件输入较大功率时,表面也不易过热。当失磁的高温层超过热态涡流透入深度时,加热层深度的增加主要靠热传导进行,效率较低。

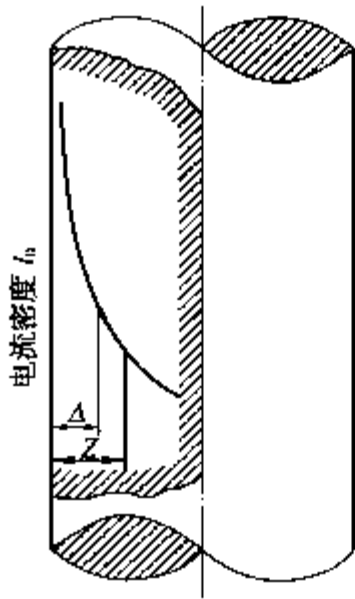


图 4-2 高频电流的表面效应

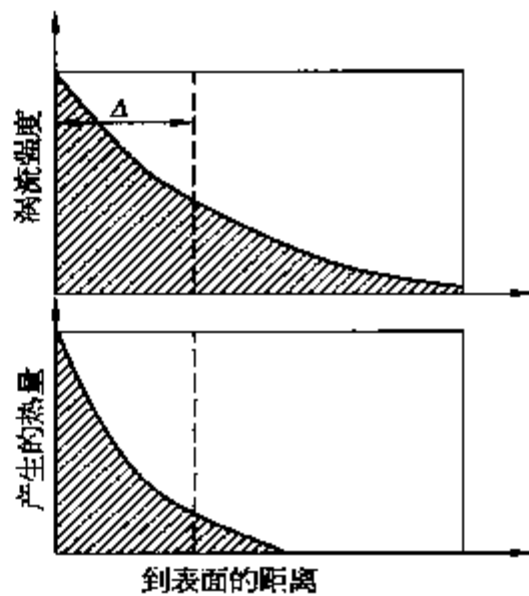


图 4-3 涡流的分布和表层热量的关系

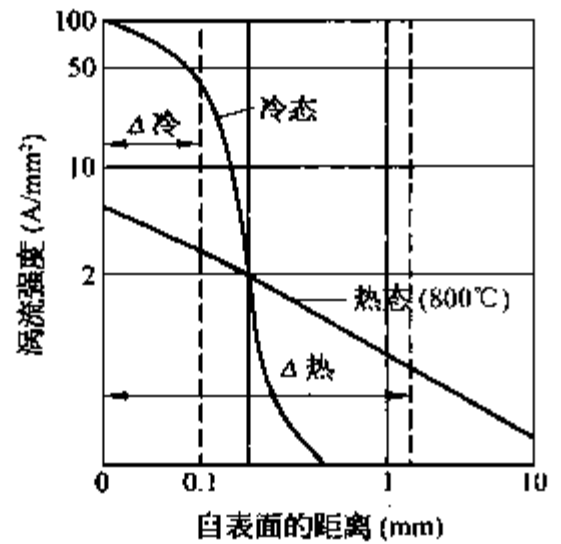


图 4-4 钢件感应加热时冷态和热态的涡流分布曲线

### 三、邻近效应

当同向或反向的交变电流通过两邻近导体(如图 4-5 所示的汇流排)时,由于电流电动势和自感电动势的相互作用,同向电流系统中的最大磁场强度在汇流排的外侧,而反向电流系统在内侧,这种现象就是邻近效应。导体间距越小,邻近效应越强。设计感应器时可利用邻近效应控制工件的表面加热范围,实现集中加热。

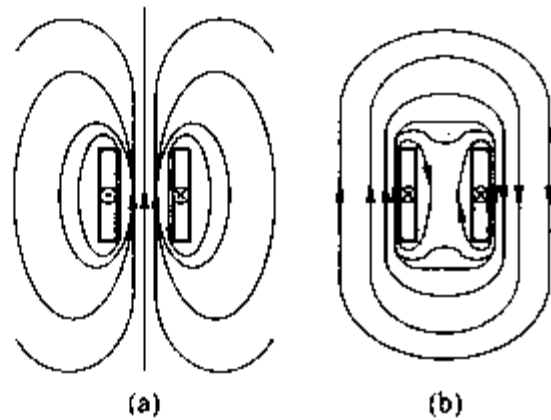


图 4-5 存在邻近效应时磁场和电流分布示意图  
(a) 反向电流; (b) 同向电流

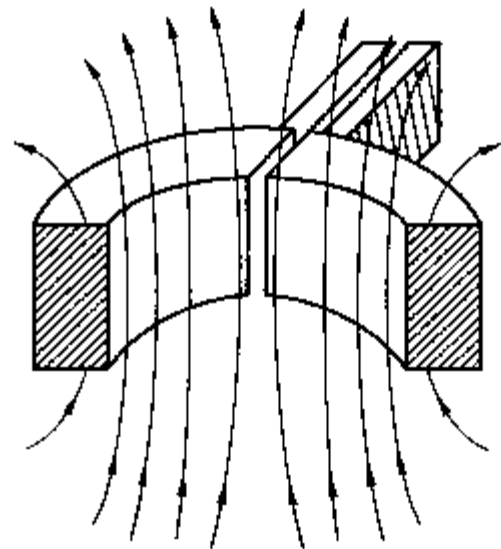


图 4-6 交变电流的圆环效应

### 四、圆环效应

当交变电流通过环形感应器时,由于交变磁场的作用,使外表面的自感电动势增大,产生电流集中在环内侧的现象,这就是圆环效应,见图 4-6。它对于加热工件外表面是有利的,而加热工件内孔时,却使感应器的效率显著降低。为此,需加导磁体来改变磁场强度的分布,使电流趋向工件需要加热的表面。

### 五、导磁体槽口效应

当交变电流通入嵌入导磁体槽口中的矩形导体时,电流只在导磁体开口处的导体表面通过,这一现象称为导磁体的槽口效应,如图 4-7、图 4-8 所示。导磁体的槽口越深,电流频率越高,导磁体的槽口效应就越强。利用导磁体槽口效应可把导体中的电流驱赶到感应器的任何所需表面,提高加热效率。

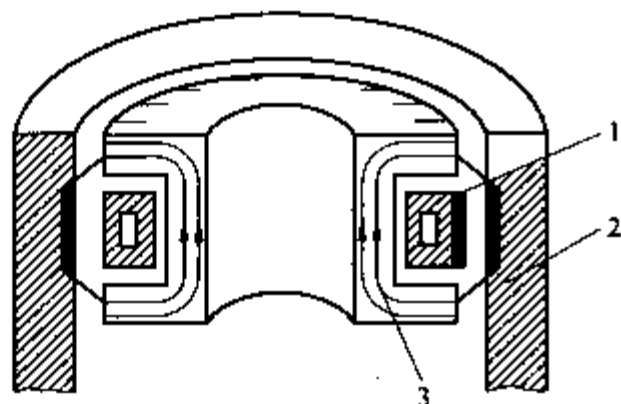


图 4-7 导磁体槽口向外的内孔加热感应器  
1—导体；2—工件；3—导磁体

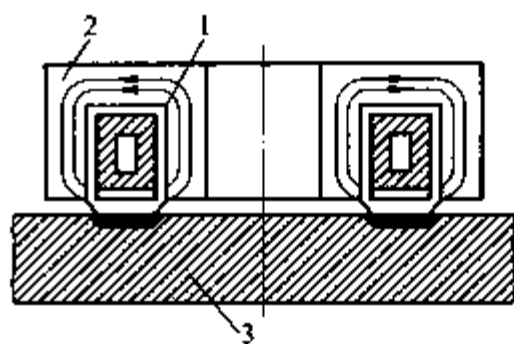


图 4-8 导磁体槽口向下的平面加热感应器  
1—导体；2—导磁体；3—平面

## 六、尖角效应

感应加热时，工件尖角、棱边部位的电流密度大，加热速度快，易过热，这种现象称为尖角效应。为此，需在感应器设计制作及淬火工艺方面采取相应措施。

表面效应、邻近效应、圆环效应、尖角效应和导磁体的槽口效应均随交变电流频率的增高而加剧，其中的邻近效应和圆环效应还随导体截面的增大、导体间距减少和圆环曲率增大而加剧。

## 第二节 感应热处理工艺

零件应根据服役条件及其选用材料拟定感应热处理的技术要求，并制定合理的感应热处理规范，包括电流频率、加热和冷却方法、功率、加热时间或连续淬火的移动速度等参数。

### 一、硬化层深度

零件表面硬化层深度应根据它的服役条件来确定。表 4-2 列出了典型服役条件下硬化层深度的要求。

表 4-2 几种典型服役条件下硬化层深度的要求

失效原因	工作条件	硬化层深度及硬度要求
磨 损	滑动磨损且负荷较小	以尺寸公差为限，有效硬化层深度一般为 1~2 mm，表面硬度 55~63 HRC，都以取上限为好
	负荷较大或受冲击载荷	一般在 2.0~6.5 mm 之间，硬度 55~63 HRC，可取下限
疲 劳	周期性弯曲或扭转负荷	一般为 2.0~12 mm，中小型轴类可取半径的 10%~20%，直径小于 40 mm 取下限，过渡层为硬化层的 25%~30%

注：齿轮硬化层深度一般取  $0.2m \sim 0.4m$ ， $m$  为齿轮模数（参见 GB5671）。

### 二、电流频率

电流频率的高低影响电流热态透入深度、工件的加热方式、感应器的设计和工件淬火后的质量。由于大多数感应淬火的钢材的加热温度都在  $800 \sim 1000^\circ\text{C}$  之间，而且磁导率  $\mu$  和电阻率  $\rho$  在此温度范围内基本上是定值，所以透热深度的计算公式可简化为下式：

$$\Delta_{800^\circ\text{C}} = \frac{500}{\sqrt{f}} \quad (\text{mm})$$

按上式可以算出感应加热设备对钢件加热时的电流热态透入深度  $\Delta_{800^\circ\text{C}}$ ，各种频率的电流热态涡流透入深度见表 4-3。

表 4-3 各种频率的电流热态透入深度

频段	高频				超音频	中频			
频率(kHz)	500~800	300~500	200~300	100~200	30~40	8	4	2.5	1
$\Delta_{800^\circ\text{C}}$ (mm)	0.7~0.56	0.9~0.7	1.1~0.9	1.6~1.1	2.9~2.5	5.6	7.9	10	15.8

为了获得高生产率和良好的淬火质量,必须采用透入式加热,使硬化层深度小于电流透入深度,最好是 $\Delta_{800^\circ\text{C}}/2$ 。各种硬化层深度所需电流频率见表 4-4。

表 4-4 硬化层深度与设备电流频率的关系

硬化层深度(mm)	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	10.0
最高频率(Hz)	250 000	100 000	60 000	30 000	15 000	8 000	2 500
最低频率(Hz)	15 000	7 000	4 000	1 500	1 000	500	150
最佳频率(Hz)	60 000	25 000	15 000	7 000	4 000	1 500	500
推荐使用设备	晶体管式 或电子管式	晶体管式或 机式(8 kHz)	晶体管式或 机式(8 kHz)	机式 (8 kHz)	机式 (2.5 kHz)	机式 (2.5 kHz)	晶体管式或机式 (0.5、1.0 kHz)

为了获得较高的加热效率,圆柱形工件感应加热时,选择电流频率还需考虑工件直径大小的影响。表 4-5 列出了零件直径、硬化层深度与电流频率之间的关系。

表 4-5 按工件直径和硬化层深度选择电流频率的依据

硬化层深度(mm)	工件直径(mm)	1 000 Hz	3 000 Hz	10 000 Hz	20~600 kHz
0.4~1.3	6~25				好
1.3~2.5	11~16 16~25 25~30 >50	中	中 好	中 好 好 好	好 好 中 差
2.5~5.0	25~50 50~100 >100	好 好	好 好 中	好 中 差	差

注:好——表示加热效率高。中——有两种情况:比“好”的频率低,尚可用来将所需硬化层深度加热到淬火温度,但效率低;比“好”的频率高,比功率大时,易造成表面过热,加热效率亦低。差——频率过高,只有用很低的频率才能保证表面不过热。

齿轮感应淬火的频率选择与模数  $m$ 、齿数  $Z$ 、齿宽  $B$  和淬火方法均有关系。对于中、小模数的齿轮和齿轴,全齿同时加热淬火或全齿连续加热淬火时可按以下公式计算或按表 4-6 和表 4-7 选择最佳频率:  
 $f=600/m^2$  (kHz)。

表 4-6 齿轮全齿表面淬火的频率选择

加热淬火方法	模数(mm)	电流频率(kHz)	加热及淬火效果
全齿同时加热淬火 (或连续淬火)	1~5	200~300	模数 2.3~3.5 mm 加热质量较好
	2~6	60~70	模数 4~5 mm 加热轮廓线明显,齿顶与齿根温度差较小,加热及淬火质量较好
	5~10	8.0	模数 7~8 mm 齿顶与齿根温度均匀,加热及淬火质量较好

表 4-7 齿轮单齿表面淬火的频率选择

淬火方法	模数(mm)	电流频率(kHz)	加热及淬火效果
单齿加热淬火(沿齿面或沿齿沟连续加热淬火)	5~10	200~300	沿齿沟连续淬火,可以得到较为理想的硬化层分布
	8~24	8.0	沿齿沟连续淬火,可以得到较为理想的硬化层分布,硬化层深度也较深

对于一些锯齿类、刀刃类、精密齿轮等要求高硬度、高耐磨性的工件,使用超高频脉冲(例如  $f=27$  MHz)感应淬火,加热速度快,淬火后组织细,不必回火。超高频脉冲淬火的应用实例见表 3-19。

### 三、功率

频率确定后,应按电流频率和要求的加热深度选择合理的比功率,实现快速加热。表 4-8 和表 4-9 分别是轴类零件表面加热和齿轮全齿同时加热时比功率的选择范围。表 4-10 是钢的穿透加热所需比功率的近似值。从表 4-11 中可根据要求的淬硬层深度选择加热时间和比功率。图 4-9 是连续加热淬火时,根据淬硬层深度和所需最高表面温度求比功率和感应器移动速度的曲线图。表 4-12 列出了几种高频感应淬火比功率与工艺参数的比较。

表 4-8 轴类零件表面加热比功率的选择

频率(kHz)	硬化层深度(mm)	比功率(kW/cm <sup>2</sup> )		
		低 值	最佳值	高 值
500	0.4~1.1	1.1	1.6	1.9
	1.1~2.3	0.5	0.8	1.2
10	1.5~2.3	1.2	1.6	2.5
	2.3~3.0	0.8	1.6	2.3
	3.0~4.0	0.8	1.6	2.1
2.5	2.5~5.0	1.0	3.0	7.0
	4.0~7.0	0.8	3.0	6.0
	5.0~10.0	0.8	3.0	5.0
8	1.0~3.0	1.2	2.3	4.0
	2.0~4.0	0.8	2.0	3.5
	3.0~6.0	0.4	1.7	2.8
3	2.3~3.0	1.6	2.3	2.6
	3.0~4.0	0.8	1.6	2.1
	4.0~5.0	0.8	1.6	2.1
1	5.0~7.0	0.8	1.6	1.9
	7.0~9.0	0.8	1.6	1.9

表 4-9 齿轮全齿同时加热比功率的选择( $f: 200\sim 300$  kHz)

模数(mm)	1~2	2.5~3.5	3.75~4	5~6
比功率(kW/cm <sup>2</sup> )	2~4	1~2	0.5~1	0.3~0.6

表 4-10 钢的穿透加热所需比功率近似值<sup>①</sup>(W/mm<sup>2</sup>)

频率(Hz)	比 功 率				
	150~425℃	425~760℃	760~980℃	980~1 095℃	1 095~1 205℃
60	0.09	0.23	②	②	②
180	0.08	0.22	②	②	②
1 000	0.06	0.19	0.78	1.55	2.17
3 000	0.05	0.16	0.62	0.85	1.09
10 000	0.03	0.12	0.47	0.70	0.85

注：① 此表为淬火、回火或锻造作业时，使用合适频率发挥设备正常工作效率的情况，一般这些比功率是对 12~50 mm<sup>2</sup> 截面尺寸而言。

② 不推荐使用。

表 4-11 根据淬硬层深度选择加热时间与比功率

项 目	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	
直径 (mm)	<i>f</i> =2.5 kHz 圆柱外表面加热																		
20	2	0.8	2.65	3	1.5	1.50	4	2.0	1.18	5			6			7			
30	2	1.0	2.62	3	2.0	1.35	4	3.1	1.00	5	5.5	0.65	6			7			
40	2	1.0	2.60	3	2.3	1.28	4	4.0	0.88	5	7.1	0.58	6	10.0	0.45	7	13.3	0.38	
50	2	1.0	2.60	3	2.7	1.24	4	4.8	0.81	5	8.5	0.54	6	13.0	0.41		17.8	0.34	
60	2	1.0	2.60	3	3.0	1.21	4	5.2	0.79	5	9.5	0.51	6	15.0	0.39	7	20.5	0.31	
70	2	1.0	2.60	3	3.2	1.20	4	5.6	0.78	5	10.1	0.50	6	16.1	0.38	7	22.8	0.30	
80	2	1.0	2.60	3	3.1	1.20	4	5.7	0.76	5	10.8	0.49	6	17.2	0.37	7	25.0	0.29	
90	2	1.0	2.60	3	3.1	1.20	4	6.0	0.75	5	11.3	0.49	6	18.0	0.30	7	26.2	0.28	
100	2	1.0	2.60	3	3.1	1.20	4	6.0	0.76	5	11.7	0.49	6	18.7	0.35	7	27.8	0.28	
110	2	1.0	2.60	3	3.1	1.20	4	6.0	0.75	5	11.9	0.49	6	19.2	0.35	7	28.5	0.28	
厚度 (mm)	<i>f</i> =2.5 kHz 平面零件单面加热																		
10	2	0.7	3.70	3	3.0	1.80	4	5.9	1.00	5	8.8	0.80	6	11.0	0.66				
15	2	0.7	3.55	3	3.6	1.62	4	7.9	0.88	5	11.9	0.68	6	16.5	0.54				
20	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	14.2	0.60	6	22.0	0.46	7	29.0	0.40	
25	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	16.5	0.52	6	27.5	0.40	7	38.0	0.38	
30	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	17.5	0.52	6	29.8	0.40	7	41.5	0.35	
35	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18.0	0.52	6	30.7	0.40	7	42.7	0.35	
40	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18.0	0.52	6	31.0	0.40	7	43.5	0.35	
45	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18.0	0.52	6	31.0	0.40	7	44.0	0.35	
50	2	0.7	3.52	3	4.0	1.54	4	8.7	0.78	5	18.0	0.52	6	31.0	0.40	7	44.2	0.35	

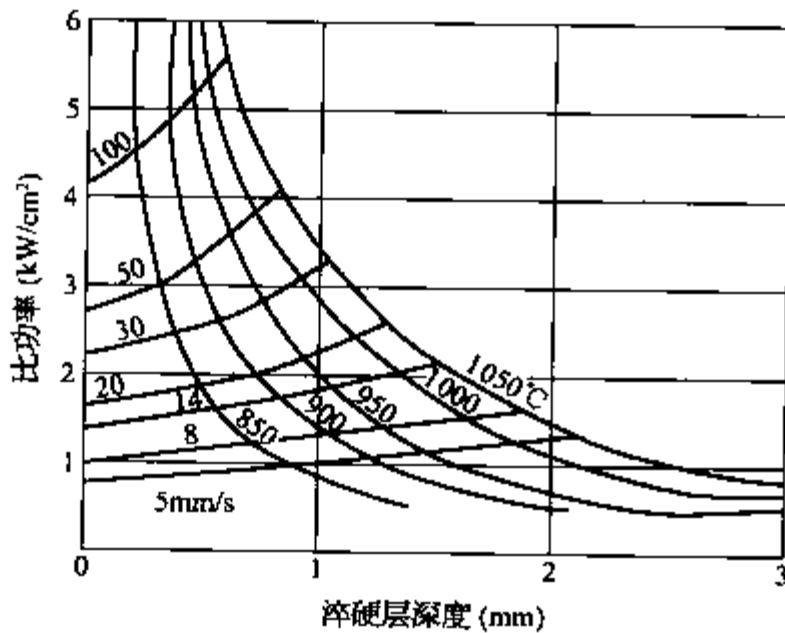


(续表)

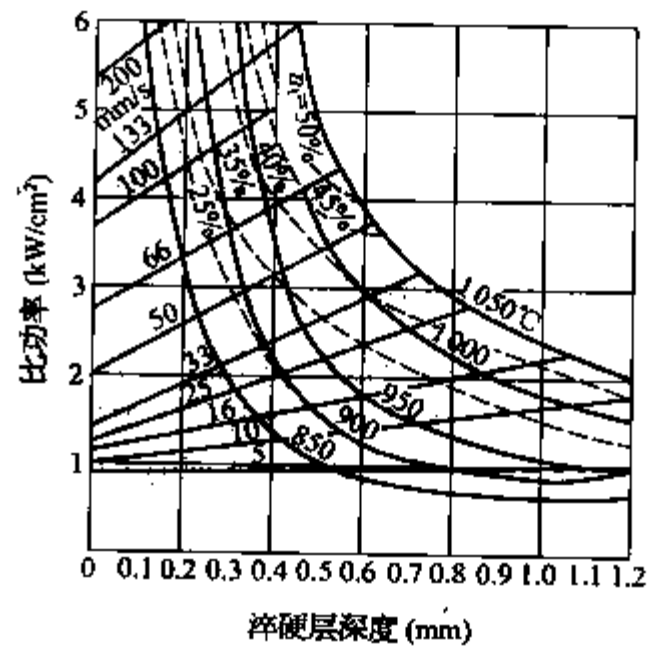
项 目	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )
直径 (mm)	$f=4\text{ kHz}$ 圆柱外表面加热																	
20	2	1.0	2.20	3	1.9	1.25	4	2.5	0.98	5			6			7		
30	2	1.3	2.17	3	2.5	1.12	4	3.9	0.83	5	6.9	0.54	6			7		
40	2	1.3	2.17	3	2.9	1.06	4	5.0	0.73	5	8.9	0.48	6	12.5	0.37	7	16.6	0.32
50	2	1.3	2.17	3	3.4	1.03	4	6.0	0.67	5	10.6	0.45	6	16.3	0.33	7	22.3	0.28
60	2	1.3	2.17	3	3.8	1.00	4	6.5	0.66	5	11.9	0.42	6	18.8	0.32	7	25.6	0.26
70	2	1.3	2.17	3	4.0	1.00	4	7.0	0.65	5	12.6	0.41	6	20.1	0.32	7	28.5	0.25
80	2	1.3	2.17	3	3.9	1.00	4	7.1	0.63	5	13.5	0.40	6	21.5	0.31	7	31.3	0.24
90	2	1.3	2.17	3	3.9	1.00	4	7.5	0.62	5	14.1	0.40	6	27.0	0.30	7	32.8	0.23
100	2	1.3	2.17	3	3.9	1.00	4	7.5	0.62	5	14.6	0.40	6	23.4	0.30	7	34.8	0.23
110	2	1.3	2.17	3	3.9	1.00	4	7.5	0.62	5	14.9	0.40	6	24.0	0.30	7	35.6	0.23
厚度 (mm)	$f=4\text{ kHz}$ 平面零件单面加热																	
10	2	0.9	3.10	3	3.8	1.49	4	7.4	0.83	5	11.0	0.66	6	13.8	0.55	7		
15	2	0.9	2.95	3	4.5	1.34	4	9.9	0.73	5	14.9	0.56	6	20.6	0.45	7		
20	2	0.9	2.92	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	17.8	0.50	6	27.5	0.38	7	36.3	0.33
25	2	0.9	2.92	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	20.6	0.43	6	34.4	0.33	7	47.5	0.32
30	2	0.9	2.92	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	21.9	0.43	6	37.3	0.33	7	51.9	0.29
35	2	0.9	2.92	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	22.5	0.43	6	38.9	0.33	7	53.4	0.29
40	2	0.9	2.92	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	22.5	0.43	6	38.8	0.33	7	54.4	0.29
45	2	0.9	2.92	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	22.5	0.43	6	38.8	0.33	7	55.0	0.29
50	2	0.9	2.92	3	5.0	1.28	4	10.9	0.65	5	22.5	0.43	6	38.8	0.33	7	55.3	0.29
直径 (mm)	$f=8\text{ kHz}$ 圆柱外表面加热																	
20	2	1.2	1.70	3	3.0	0.83	4	4.5	0.58	5			6			7		
30	2	1.5	1.58	3	3.8	0.78	4	7.0	0.51	5	10.0	0.38	6	14.0	0.30	7	18.0	0.25
40	2	1.8	1.52	3	4.1	0.74	4	8.5	0.48	5	13.7	0.34	6	20.0	0.26	7	24.5	0.21
50	2	1.8	1.50	3	4.3	0.72	4	9.5	0.46	5	16.0	0.32	6	24.0	0.24	7	32.0	0.19
60	2	1.8	1.50	3	5.0	0.71	4	10.0	0.45	5	18.0	0.31	6	27.0	0.22	7	38.0	0.18
70	2	1.8	1.50	3	5.5	0.70	4	10.8	0.44	5	19.3	0.30	6	30.0	0.21	7	43.0	0.17
80	2	1.8	1.50	3	5.8	0.70	4	11.5	0.44	5	20.2	0.30	6	32.0	0.21	7	47.0	0.17
90	2	1.8	1.50	3	5.8	0.70	4	12.0	0.44	5	21.0	0.30	6	34.0	0.21	7	50.0	0.17
100	2	1.8	1.50	3	5.8	0.70	4	12.2	0.44	5	22.0	0.30	6	35.5	0.21	7	52.5	0.17
110	2	1.8	1.50	3	5.8	0.70	4	12.5	0.44	5	22.5	0.29	6	36.5	0.21	7	54.5	0.17
厚度 (mm)	$f=8\text{ kHz}$ 平面零件单面加热																	
10	2	1.6	1.77	3	4.0	1.10	4	8.0	0.70	5	10.0	0.50	6	13.0		7	17.0	
15	2	2.0	1.73	3	5.5	1.00	4	11.5	0.59	5	17.5	0.45	6	24.5	0.38	7	30.0	0.30
20	2	2.0	1.72	3	6.0	0.97	4	13.0	0.58	5	22.0	0.41	6	30.5	0.32	7	41.0	0.26
25	2	2.0	1.72	3	6.0	0.97	4	13.5	0.56	5	24.5	0.40	6	35.0	0.30	7	52.0	0.22
30	2	2.0	1.72	3	6.0	0.97	4	13.5	0.56	5	25.0	0.40	6	38.0	0.29	7	62.0	0.21
35	2	2.0	1.72	3	6.0	0.97	4	13.5	0.56	5	25.0	0.40	6	40.0	0.29	7	64.0	0.21
40	2	2.0	1.72	3	6.0	0.97	4	13.5	0.56	5	25.0	0.40	6	42.0	0.29	7	70.0	0.21
45	2	2.0	1.72	3	6.0	0.97	4	13.5	0.56	5	25.0	0.40	6	42.0	0.29	7	71.0	0.21
50	2	2.0	1.72	3	6.0	0.97	4	13.5	0.56	5	25.0	0.40	6	42.0	0.29	7	71.5	0.21

(续表)

项 目	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	硬化层深度 (mm)	加热时间 (s)	比功率 (kW/cm <sup>2</sup> )	
直径 (mm)	$f=250\text{ kHz}$ 圆柱外表面加热																		
10	2	2.5	0.50	3			4			5			6			7			
20	2	4.0	0.44	3	9.0	0.28	4	11.5	0.22	5			6			7			
30	2	7.0	0.43	3	12.5	0.27	4	19.0	0.21	5	23.0	0.17	6	29.0	0.15	7	34.0	0.13	
40	2	8.0	0.43	3	16.5	0.27	4	23.0	0.20	5	31.0	0.16	6	39.0	0.14	7	45.0	0.12	
50	2	9.0	0.42	3	18.0	0.26	4	28.0	0.19	5	39.0	0.16	6	48.0	0.13	7	56.0	0.11	
60	2	9.3	0.42	3	20.0	0.26	4	31.0	0.19	5	43.0	0.15	6	56.0	0.13	7	68.0	0.11	
70	2	9.5	0.42	3	20.5	0.26	4	34.0	0.19	5	49.0	0.15	6	62.0	0.12	7	78.0	0.11	
80	2	9.7	0.42	3	21.0	0.26	4	37.0	0.19	5	52.0	0.15	6	69.0	0.12	7	86.0	0.10	
90	2	9.8	0.42	3	22.0	0.26	4	38.5	0.19	5	56.0	0.15	6	73.0	0.12	7	92.0	0.10	
100	2	10.0	0.42	3	23.0	0.26	4	40.0	0.19	5	59.0	0.15	6	79.0	0.12	7	99.0	0.10	
厚度 (mm)	$f=250\text{ kHz}$ 平面零件单面加热																		
10	2	11.0	0.42	3	19.0	0.29	4	26.0	0.24	5	30.0	0.21	6	37.0	0.18	7	40.0	0.17	
15	2	14.0	0.41	3	26.0	0.27	4	38.0	0.22	5	49.0	0.19	6	58.0	0.16	7	65.0	0.14	
20	2	17.0	0.41	3	30.0	0.26	4	49.0	0.21	5	62.0	0.17	6	78.0	0.15	7	90.0	0.13	
25	2	17.0	0.41	3	35.0	0.26	4	56.0	0.21	5	73.0	0.17	6	91.0	0.14	7	112.0	0.22	
30	2	17.0	0.41	3	37.0	0.25	4	60.0	0.20	5	83.0	0.16	6	107.0	0.14	7	130.0	0.12	
35	2	17.0	0.41	3	37.5	0.25	4	64.0	0.20	5	90.0	0.16	6	118.0	0.14	7	148.0	0.12	
40	2	17.0	0.41	3	38.0	0.25	4	65.0	0.20	5	96.0	0.16	6	127.0	0.14	7	160.0	0.12	
45	2	17.0	0.41	3	38.0	0.25	4	65.0	0.20	5	98.0	0.16	6	132.0	0.14	7	169.0	0.12	
50	2	17.0	0.41	3	38.0	0.25	4	65.0	0.20	5	100.0	0.16	6	139.0	0.14	7	178.0	0.12	



(a)



(b)

图 4-9 根据淬硬层深度与所需最高表面温度求比功率与移动速度的曲线图

(a) 电源频率  $f=10\text{ kHz}$ ; (b) 电源频率  $f=550\text{ kHz}$

表 4-12 几种高频感应淬火比功率与工艺参数比较

工 艺 参 数	超高频脉冲感应淬火	大功率脉冲感应淬火	普通高频感应淬火
振荡频率(kHz)	27 120	200~300	200
振荡功率(kW)	—	>100	—
比功率(kW/cm <sup>2</sup> )	10~30	5	0.2
加热速度(°C/s)	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup>
加热时间(s)	0.001~0.1	0.2~0.6	0.1~5

比功率确定后,可按下式算出感应加热设备的额定功率  $P_E$ :

$$P_E = F\rho/\eta_1\eta_2 \quad (\text{kW})$$

式中  $F$ ——一次加热淬火的面积(cm<sup>2</sup>);

$\rho$ ——比功率(kW/cm<sup>2</sup>);

$\eta_1$ ——淬火变压器效率,一般  $\eta_1=0.7\sim0.8$ (中频取上限);

$\eta_2$ ——感应器效率,一般  $\eta_2=0.7\sim0.85$ (中频取上限)。

表 4-13 是几种国产设备淬火加热最大面积。

表 4-13 几种国产设备的淬火加热最大面积  $S_{\max}$ 

电 源 种 类	额定功率 $P_E$ (kW)	同时加热淬火	连续加热淬火	
		$S_{\max}$ (cm <sup>2</sup> )	$S_{\max}$ (cm <sup>2</sup> )	直径 $d_{\max}$ (cm)
机械式或晶体管式 中频发电机 (2.5 kHz 和 8 kHz)	100	128	64	20.4
	160	204.8	102.4	32.6
	200	256	128	40.8
	250	320	160	50.9
电子管式高频设备 (100~300 kHz)	60	58.8	29.4	9.4
	100	98	49	15.6
	200	196	98	31.2

注:连续加热淬火所用圆环感应器的有效高度为 1 cm,淬火面积宽度按 1 cm 计算。

#### 四、加热方法和冷却方式

感应加热的基本方法有同时加热和连续加热两种。在大批量生产中,只要设备功率足够而且工件上应淬表面均能达到均匀加热时,应选用同时加热淬火法,它的主要工艺参数是设备的输出功率和加热时间。单件或小批量的轴、杆类零件以及较大平面的零件应采用连续加热淬火法。

同时加热淬火的冷却方式也有两种;一种是加热后的工件立即喷射冷却,另一种是加热后的工件浸入冷却液中冷却。

#### 五、感应淬火温度

感应淬火的加热温度应根据钢种、原始组织及在相变区的加热速度来确定。表 4-14 和表 4-15 分别是不同材料和典型钢种所推荐的感应淬火温度及其性能。

表 4-14 不同材料推荐的感应淬火温度及希望的表面硬度<sup>①</sup>

金 属		淬火温度(°C)	淬火介质 <sup>②</sup>	硬度 <sup>③</sup> HRC
碳钢及 合金钢 <sup>④</sup>	$w_C 0.30\%$	900~925	水、PAG 水溶液	50
	$w_C 0.35\%$	900	水、PAG 水溶液	52
	$w_C 0.40\%$	870~900	水、PAG 水溶液	55
	$w_C 0.45\%$	870~900	水、PAG 水溶液	58
	$w_C 0.50\%$	870	水、PAG 水溶液	60
	$w_C 0.60\%$	845~870	水、PAG 水溶液	64
			油、有机聚合物水溶液	62
		815~845	水、PAG 水溶液	64
油、有机聚合物水溶液			62	
铸铁 <sup>⑤</sup>	灰 铸 铁	870~925	水、PAG 水溶液	45
	珠光体可锻铸铁	870~925	水、PAG 水溶液	48
	球墨铸铁	900~925	水、PAG 水溶液	50
不锈钢 <sup>⑥</sup>	20Cr13	1 095~1 150	油、空气、有机聚合物水溶液	50

注：① 仅指成功应用感应淬火的典型钢种。

② 淬火介质选择应根据钢材淬透性、工件直径、硬化层深度、硬度和畸变及淬裂倾向，选择水（包括 PAG 等有机聚合物水溶液）或油。

③ 最低表面硬度。

④ 包括同碳量的易切削钢和合金钢；含有 Cr、Mo、W、V 等碳化物形成元素的合金钢，其加热温度应比表列温度高 50~110°C。

⑤ 钢基体中的化合碳应大于  $w_C 0.4\%$ ，硬度随化合碳的量而改变。

⑥ 其他马氏体不锈钢也可进行感应淬火。

表 4-15 常用钢表面淬火时推荐的加热温度(喷水冷却)

钢 号	预备热处理	下列情况下的加热温度(°C)			
		炉中加热	$A_{c1}$ 以上的加热速度(°C/s)		
			$A_{c1}$ 以上的加热持续时间(s)		
			30~60 2~4	100~200 1.0~1.5	400~500 0.5~0.8
35	正 火	840~860	880~920	910~950	970~1 050
	退火或没有处理	840~860	910~950	930~970	980~1 070
	调 质	840~860	860~900	890~930	930~1 020
40	正 火	820~850	860~910	890~940	950~1 020
	退火或没有处理	810~830	890~940	940~960	960~1 040
	调 质	820~850	840~890	870~920	920~1 000
45、50	正 火	810~830	850~890	880~920	930~1 000
	退火或没有处理	810~830	880~920	900~940	950~1 020
	调 质	810~830	830~870	860~900	920~980
45Mn2 50Mn	正 火	790~810	830~870	860~900	920~980
	退火或没有处理	790~810	860~900	880~920	930~1 000
	调 质	790~810	810~850	840~880	900~960

(续表)

钢号	预备热处理	下列情况下的加热温度(°C)			
		$A_{c1}$ 以上的加热速度(°C/s) $A_{c1}$ 以上的加热持续时间(s)			
		炉中加热	$\frac{30\sim50}{2\sim4}$	$\frac{100\sim200}{1.0\sim1.5}$	$\frac{400\sim500}{0.5\sim0.8}$
65Mn	正火	760~780	810~850	840~880	900~960
	退火或没有处理	770~790	840~880	860~900	920~980
	调质	770~790	790~830	820~860	860~920
35Cr	调质	850~870	880~920	900~940	950~1 020
	退火	850~870	940~980	960~1 000	1 000~1 060
40Cr、45Cr 40CrNiMo	调质	830~850	860~900	880~920	940~1 000
	退火	830~850	920~960	940~980	980~1 050
40CrNi	调质	810~830	840~880	860~900	920~980
	退火	810~830	900~940	920~960	950~1 020
T8A	退火	760~780	820~860	840~880	900~960
T10A	正火或调质	760~780	780~820	800~860	820~900
CrWMn	退火	800~830	740~880	860~900	900~950
	正火或调质	800~830	820~860	840~880	870~920

## 六、冷却方法和冷却介质

感应淬火的冷却方法及冷却介质应根据材质、工件形状和大小、采用的加热方式和淬硬层深度等因素综合考虑确定。常用的冷却方法和冷却介质见图 4-10。形状简单的工件可采用喷水冷却。低合金钢工件和形状复杂的碳钢工件可采用聚乙烯醇水溶液、聚烷撑乙二醇(PAG 类如 Ucon A、AQ251 等)水溶液等进行喷射冷却。形状复杂的合金钢工件可酌情采用油浸冷或适当浓度的 Ucon E 等有机聚合物水溶液浸冷、喷射冷却。

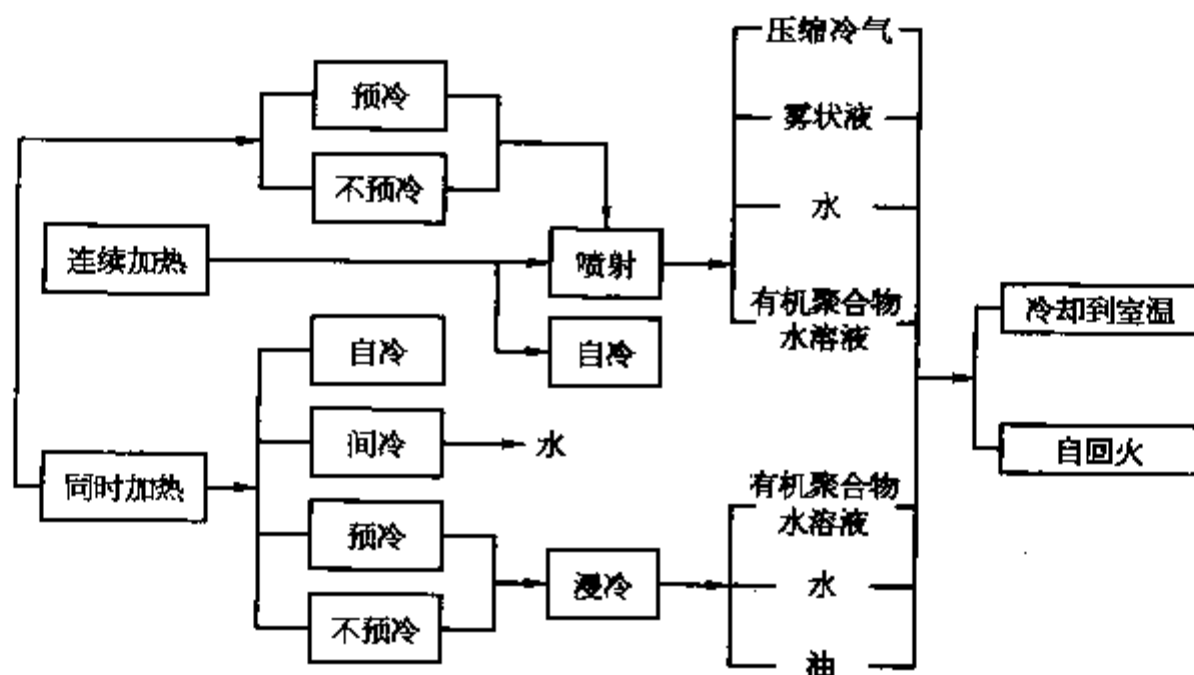


图 4-10 常用的冷却方法和冷却介质

为了避免产生淬火裂纹或畸变量过大,必须控制冷却时间和喷射压力,以使工件既能保证有足够的表面硬度,又能利用工件内部余热自回火。在同时加热淬火时,当工件加热到温后,应在空气中停留瞬间以适当降低

表面温度后再喷冷或浸淬。连续淬火时可调整感应器的移动速度和间隙、喷水孔与工件的轴向夹角来改变工件的预冷时间。单独设置喷水圈时,可改变它与感应器的距离来掌控预冷时间。

几种常用冷却介质的冷却性能见表 4-16 和表 4-17。

表 4-16 几种常见冷却介质的冷却性能

冷却介质及冷却方式	喷水圈与工件的间隙(mm)	冷却条件		冷却速度(°C/s)	
		压力( $\times 101.25$ kPa)	温度(°C)	600°C	250°C
喷 水	10	4	15	1 450	1 900
		3	15	1 250	1 750
		2	15	610	860
	40	4	20	1 100	400
		4	30	890	330
		4	40	650	270
		4	60	500	200
浸 水		15	180	560	
浸 20%Ucon E 水溶液		25	120	10	
浸油(L-AN22)		50	65	10	

表 4-17 Ucon A 水溶液与水、油冷却能力的比较

淬 火 介 质	冷却速度(磁性淬火仪速度 <sup>①</sup> ,s)	
蒸馏水	2.0	
快速冷却油	8~10	
中速冷却油	10~15	
慢速冷却油	>15	
Ucon A (体积分数,%)	4	2.5
	10	3.2
	14	5.2
	18	12.8
	20	32.6
24	37.0	

注: ① 磁性淬火仪速度指仪器在规定的温度区域内所测得的冷却时间。

## 七、感应淬火件的回火

感应淬火后的工件可在炉中回火,也可采用自回火或感应加热回火。

### 1. 炉中回火

感应淬火浸淬冷透的工件或连续淬火后的工件,尤其是薄壁和形状复杂的工件,通常在空气炉中或油浴炉中回火,几种常用钢工件感应淬火后在炉中回火的规范见表 4-18。

表 4-18 几种常用钢工件感应加热表面淬火后在炉中回火的规范

钢 号	要求硬度 HRC	淬火后硬度 HRC	回 火 规 范	
			温度(°C)	时间(min)
45	40~45	$\geq 50$	280~320	45~60
		$\geq 55$	300~320	45~60
	45	$\geq 50$	200~220	45~60

(续表)

钢 号	要求硬度 HRC	淬火后硬度 HRC	回 火 规 范	
			温度(°C)	时间(min)
45	45~50	≥55	200~250	45~60
	50~55	≥55	180~200	45~60
50	53~60	54~60	160~180	45~60
40Cr	45~50	≥50	240~260	45~60
		≥55	260~280	45~60
42SiMn	45~50		220~250	45~60
	50~55		180~220	45~60
15,20Cr 20CrMnTi 20CrMnMoV (渗碳淬火后)	56~62	56~62	180~200	60~120

## 2. 自回火

自回火可以简化工艺和节约能源,能在多种情况下避免开裂,并能提高生产率。自回火时,应严格控制冷却剂的温度、喷冷时间和喷射压力。自回火具体的操作规范应由试验确定,主要适用于大批量生产。

## 3. 感应加热回火

连续感应淬火的长轴或其他工件采用感应加热回火有时较方便。该方法尤其适用于自动线生产。由于加热时间短,所得到的显微组织有极大的弥散度,回火后的工件具有较高的耐磨性和冲击韧度。表 4-19 和表 4-20 分别列出了感应加热回火的频率和功率选择。

表 4-19 感应加热回火需要的大概比功率

频率(Hz)	输入比功率 <sup>①</sup> (W/mm <sup>2</sup> )		频率(Hz)	输入比功率 <sup>①</sup> (W/mm <sup>2</sup> )	
	150~425°C	425~705°C		150~425°C	425~705°C
60	0.09	0.23	3 000	0.05	0.16
80	0.08	0.22	10 000	0.03	0.12
1 000	0.06	0.19			

注: ① 适用于  $\phi 12\sim 50$  mm 的工件。

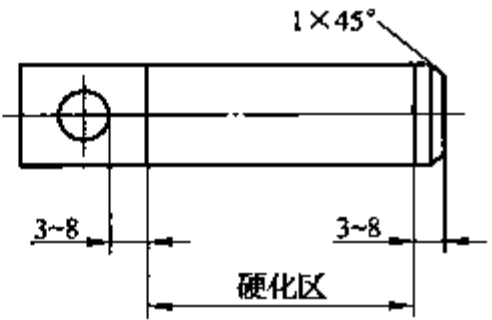
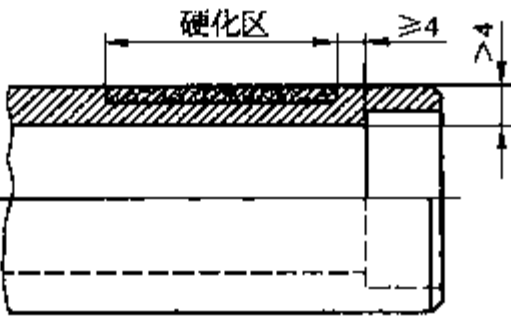
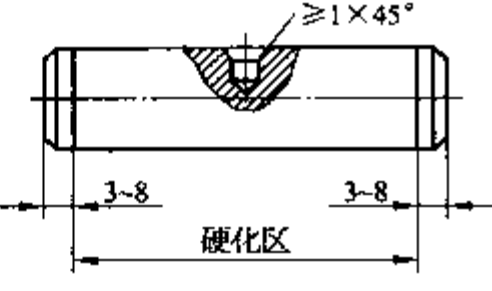
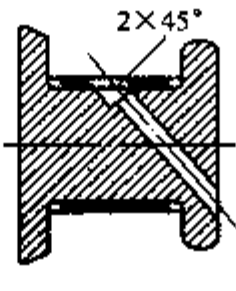
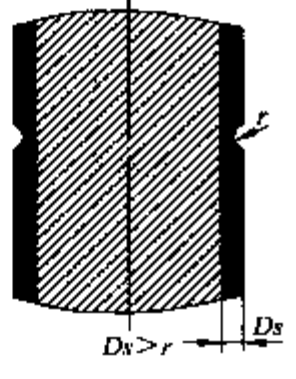
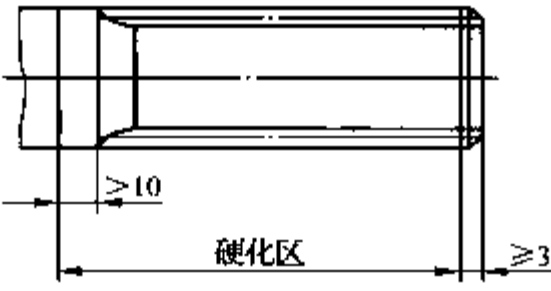
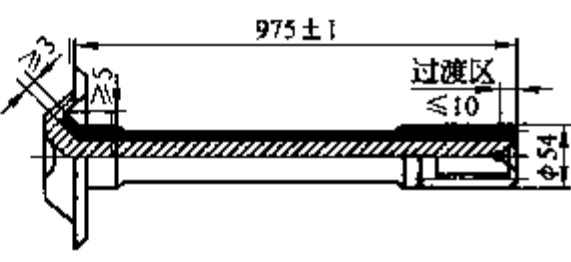
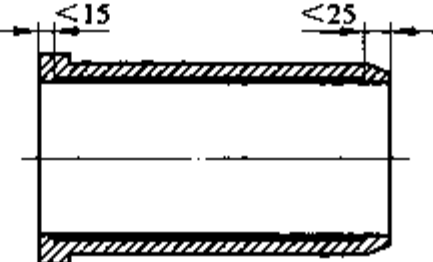
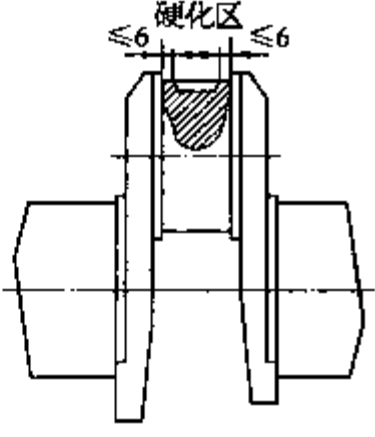
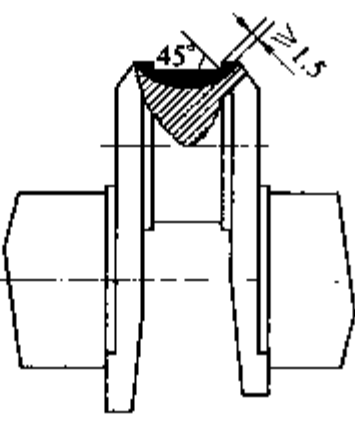
表 4-20 各种感应加热回火的频率选择

工件尺寸(mm)	最高回火温度(°C)	工频 50 Hz	频率转换器 180 Hz	固态变频或中频(Hz)			晶体管 (大于 200 Hz)
				1 000	3 000	10 000	
3.2~6.4	705	—	—	—	—	—	良好
6.4~12.7	705	—	—	—	—	良好	良好
12.7~25	425	—	较好	良好	良好	良好	较好
	705	—	差	良好	良好	良好	较好
25~50	425	较好	较好	较好	良好	较好	差
	705	—	较好	良好	良好	较好	差
50~152	425	良好	良好	良好	较好	—	—
	705	良好	良好	良好	较好	—	—
152 以上	705	良好	良好	良好	较好	—	—

## 八、工件感应淬火硬化区域的合理分布

根据零件的服役条件,原则上硬化区可以设计在工件需要的任何部位。但感应淬火中,由于各种电磁效应尤其是尖角效应,在设计时必须考虑到,在硬化层以及硬化区之中及其附近存在复杂的内应力,以免出现淬火裂纹或使用中断裂失效。表 4-21 列举了一些相关行业的设计通则。

表 4-21 感应淬火的硬化区设计通则

类型	示意图	类型	示意图
例 1: 硬化区域近轴端和孔边		例 6: 管件外圆硬化区近内孔台阶的底边	
例 2: 销子硬化区域内有小孔		例 7: 曲轴轴颈硬化区内有油孔	
例 3: 硬化区内有环形槽		例 8: 花键轴局部淬火的硬化区分布	
例 4: 半轴硬化区域分布		例 9: 气缸套硬化区分布	
例 5: 曲轴轴颈局部淬火时硬化层分布		例 10: 曲轴圆角淬火硬化层分布	



(续表)

类型	示 图	类型	示 图																											
<p>例 11: 阶梯轴两段硬化区分布</p>	<table border="1"> <tr> <td><math>D-d</math></td> <td><math>\leq 10</math></td> <td><math>&gt; 10 \sim 20</math></td> <td><math>&gt; 20</math></td> </tr> <tr> <td>电源频率</td> <td colspan="3">A(mm)</td> </tr> <tr> <td>中 频</td> <td><math>&lt; 6</math></td> <td><math>&lt; 10</math></td> <td><math>&lt; 10</math></td> </tr> <tr> <td>高 频</td> <td><math>&lt; 5</math></td> <td><math>&lt; 8</math></td> <td><math>&lt; 12</math></td> </tr> </table>	$D-d$	$\leq 10$	$> 10 \sim 20$	$> 20$	电源频率	A(mm)			中 频	$< 6$	$< 10$	$< 10$	高 频	$< 5$	$< 8$	$< 12$	<p>例 14: 硬化层内侧有平行小孔</p> <p>孔边和工件外表面的允许最小距离 <math>d</math> 与硬化层深度 <math>D</math> 有关:</p> <table border="1"> <tr> <td><math>D_s</math> (mm)</td> <td>0.5~1.0</td> <td>1.0~2.5</td> <td>2~4</td> <td>3~5</td> <td>4~7</td> </tr> <tr> <td><math>d</math> (mm)</td> <td><math>&gt; 4</math></td> <td><math>&gt; 6</math></td> <td><math>&gt; 8</math></td> <td><math>&gt; 10</math></td> <td><math>&gt; 12</math></td> </tr> </table>	$D_s$ (mm)	0.5~1.0	1.0~2.5	2~4	3~5	4~7	$d$ (mm)	$> 4$	$> 6$	$> 8$	$> 10$	$> 12$
$D-d$	$\leq 10$	$> 10 \sim 20$	$> 20$																											
电源频率	A(mm)																													
中 频	$< 6$	$< 10$	$< 10$																											
高 频	$< 5$	$< 8$	$< 12$																											
$D_s$ (mm)	0.5~1.0	1.0~2.5	2~4	3~5	4~7																									
$d$ (mm)	$> 4$	$> 6$	$> 8$	$> 10$	$> 12$																									
<p>例 12: 轴肩倒角的阶梯轴硬化层的圆弧过渡</p>		<p>例 15: 法兰盘、阶梯轴等端面淬火</p> <p>环状不淬区宽度: 高频 <math>&lt; 5 \sim 8</math> mm; 中频 <math>&lt; 8 \sim 12</math> mm</p>																												
<p>例 13: 大尺寸外圆或平面分区淬火; 大端面或滚道等回转变连续淬火及其他数个硬化区交接的零件允许宽为 A 或 B 的软带或不淬区</p>	<table border="1"> <tr> <td rowspan="2">加热设备</td> <td colspan="2">允许不淬火宽度(mm)</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>B</td> </tr> <tr> <td>中 频</td> <td>20~25</td> <td>12~15</td> </tr> <tr> <td>高 频</td> <td><math>&lt; 12</math></td> <td><math>&lt; 10</math></td> </tr> </table>	加热设备	允许不淬火宽度(mm)		A	B	中 频	20~25	12~15	高 频	$< 12$	$< 10$	<p>例 16: 两相交面淬火硬化区分布</p> <p>允许在两面交接处附近有图示的软带或不淬区: 中频 <math>&lt; 12 \sim 15</math> mm; 高频 <math>&lt; 8</math> mm</p>																	
加热设备	允许不淬火宽度(mm)																													
	A	B																												
中 频	20~25	12~15																												
高 频	$< 12$	$< 10$																												

### 第三节 感应器的选用和设计制作

感应器是感应加热的主要工装, 它的选择和设计原则是保证工件表面加热均匀、电效率高、容易制作、安装

便捷和生产稳定可靠、操作方便。它的种类按电源可分超音频、高频(20~1 000 kHz)、中频(1~10 kHz)和工频感应器;按加热方法可分为同时加热和连续加热感应器;按形状可分圆柱外表面加热、内孔表面加热及特殊形状表面加热等感应器。

感应器由产生磁场加热工件的有效部分、将电源电流输向有效部分的汇流排、将前两者与淬火变压器夹紧的连接板以及冷却前两者或喷水冷却用的供水装置所组成。

### 一、工频感应器设计

工频感应器有单相和三相之分,按工艺不同又分为同时加热感应器和连续加热感应器。各类感应器的特点如表 4-22。工频感应器主要由有效线圈、导磁体和水冷却系统等组成,见图 4-11。

表 4-22 各类工频感应器的特点

分类原理	类别	应用	备注
按电源	单相感应器	加热功率较小时采用	功率较大时电网负荷严重失去平衡,可用附加三相平衡装置来解决
	三相感应器	加热功率较大时采用	采用三角形或星形连接
按加热方法	同时加热感应器	用于轴向高度小、加热面积小的工件	注意线圈分布,以获得均匀的加热
	连续加热感应器	用于轴向高度大、加热面积较大的工件	使用时应注意起步和终止的电源通断时机,以获得均匀的加热

#### 1. 有效线圈

工件为圆柱体时,其内径:

$$d_1 = d + 2a$$

式中  $d$ ——工件直径;

$a$ ——线圈与工件间隙,一般取  $2a = 20 \sim 100 \text{ mm}$ 。

线圈匝数  $W$  可以下式计算:

$$W = K/I$$

式中  $K$ ——常数,32 000~60 000,一般情况取 45 000;

$I$ ——感应器电流,可参照表 4-23 的数据计算。

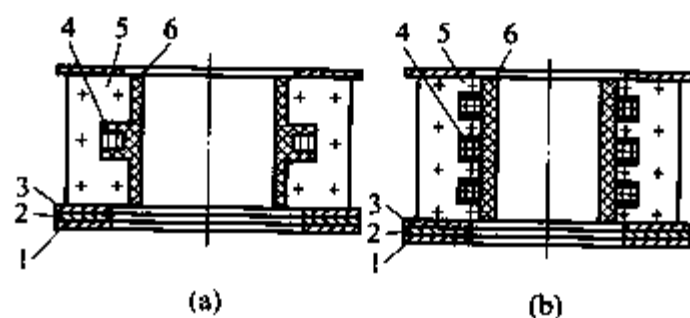


图 4-11 工频感应器的结构图

1—钢板; 2—石棉板; 3—胶木板;  
4—施感线圈; 5—导磁体; 6—绝缘体

表 4-23 工频感应器电流的计算公式及有关数据

感应器类别	计算公式 电流 $I(\text{A})$	有 关 数 据		
		电压 $U(\text{V})$	$\cos \varphi$	功率 $P(\text{kW})$
单 相	$I = \frac{P \times 1000}{U \times \cos \varphi}$	变压器次级电压	0.35~0.45	按经验选取,例如列车车轮的同时加热感应器, $P = (0.3 \sim 0.5)d$ ; 冷轧辊连续加热感应器, $P = (0.6 \sim 1.0)d$ 。其中 $d$ 为工件外径
三 相	$I = \frac{P \times 1000}{\sqrt{3}U \times \cos \varphi}$	三相变压器相电压	0.35~0.45	

线圈匝数以使用成功的老感应器采取类比法计算:

$$W_2 = \sqrt{\frac{U_2^2 h_2 P_1 D_1 W_1}{P_2 D_2 U_1^2 h_1}}$$

其中,  $P_1$ 、 $U_1$ 、 $D_1$ 、 $h_1$ 、 $W_1$  与  $P_2$ 、 $U_2$ 、 $D_2$ 、 $h_2$ 、 $W_2$  分别代表新老感应器的功率、电压、内径、高度和匝数。

线圈由纯铜管制造。在充分水冷却时(排出水温低于  $70^\circ\text{C}$ )允许通过的最大电流密度为  $20 \sim 40 \text{ A/mm}^2$ 。为保证冷却充分,把线圈以 3~5 匝为一组构成水冷回路,然后再把各组串接起来。

## 2. 导磁体

采用厚度小于 0.5 mm 的硅钢片制作。硅钢片数目  $N = kd_i/b_i$  ( $b_i$  为硅钢片厚度;  $d_i$  为线圈内径;  $k$  为硅钢片的安装紧密系数,  $k=0.85$ )。

一般情况下硅钢片分为  $n=8\sim 12$  组, 各组中的硅钢片用螺钉紧固在一起, 构成块体。每个块体的硅钢片数  $n_i = N/n$ , 有效厚度  $B = n_i \cdot b_i$ 。

所需硅钢片总有效导磁面积  $S$  可按下式计算:

$$S = \frac{U \times 10^6}{4.44fW} \quad (\text{mm}^2)$$

$U=380 \text{ V}$ ,  $f=50 \text{ Hz}$  时:

$$S = 1.71 \times 10^6 / W \quad (\text{mm}^2)$$

式中  $W$ ——线圈匝数。

## 二、中高频感应器设计

### 1. 有效部分

一般用纯铜制造, 几何形状根据工件形状、尺寸、技术要求和所定的加热方式来确定。

1) 高度 高频同时加热用单匝感应器的高度与加热均匀性有关, 可按表 4-24 选用。中频同时加热用单匝感应器的高度等于或稍大于工件上淬火区长度, 但通常不大于 150 mm。中频连续加热淬火用单匝感应器高度, 生产中常用 14~30 mm。

表 4-24 同时加热淬火用的高频单匝感应器的高度

工件直径 $D(\text{mm})$	感应器高度 $h(\text{mm})$	备 注
$\leq 25$	$h \leq D/2$	1) 若工件淬火部位必须超过表内所列数据时, 则选用多匝感应器 2) 多匝感应器高度与直径的比应为 $h/D=3\sim 5$ , 否则, 中间温度偏高 3) 连续加热时, $h=10\sim 15 \text{ mm}$ , 如工件有淬硬台阶, 可取 5~8 mm
25~50	14~20	
50~100	20~25	
100~200	25~30	
>200	<30	

2) 间隙 当圆柱形工件的直径小于 50 mm 时, 间隙取 2~4 mm; 当圆柱形工件的直径为 50~150 mm 时, 间隙取 3~5 mm。曲轴旋转淬火时, 间隙取 0.15 倍的工件直径。为了兼顾加热效率和形状复杂零件的加热均匀性, 感应器与工件的间隙可按表 4-25 选用。

表 4-25 感应器和工件的间隙

工件或淬火部位	加 热 方 式	(mm)	
		高 频	中 频
简单圆柱外表面	同 时	1.5~3.0 ( $\geq 5$ )	2~5
简单圆柱外表面	连 续	2~4	2~5
齿 轮 模数 1.0~2.5 mm 模数 3.0~3.5 mm 模数 4.0~4.5 mm 模数 5.0~6.0 mm 模数 7.0~8.0 mm	全齿同时	2.0~2.5 2.5~3.5 3.0~4.5 4.0~5.5	4.5~5.5
内 孔	同 时	0.5~2.0	
	连 续	1~2	2~3
平 面		0.5~1.5	1~3

3) 感应圈有效截面尺寸 应按电流密度、加热时有无冷却和自身机械强度来确定感应器的有效截面尺寸。加热时不通水冷却的应用厚度较大的铜材,通水冷却的感应圈出水温度应低于  $60^{\circ}\text{C}$ ,当有效截面较小时,可采用高压水保证足够的流量。制作感应器用铜料的厚度可参考表 4-26 选用。

表 4-26 感应圈用纯铜料厚度 (mm)

感应器有效圈工作时的条件	不同频率时感应器有效圈所用纯铜料的厚度		
	200~300 kHz	8 kHz	2.5 kHz
短时加热不通水冷却	1.5~2.5	8~12	12~16
加热时通水冷却	0.5~1.5	1.0~2.0	2.0~3.0

4) 自喷式感应器喷孔的分布及孔径 为了保证稳定的喷射压力和喷射密度,进水管的面积应大于喷孔面积的总和。感应器上喷孔的分布和孔径应参考图 4-12 和表 4-27。对壁厚大于 6 mm 的纯铜,可用阶梯法钻孔。连续加热自喷式感应器的喷孔分布与排列见表 4-28。

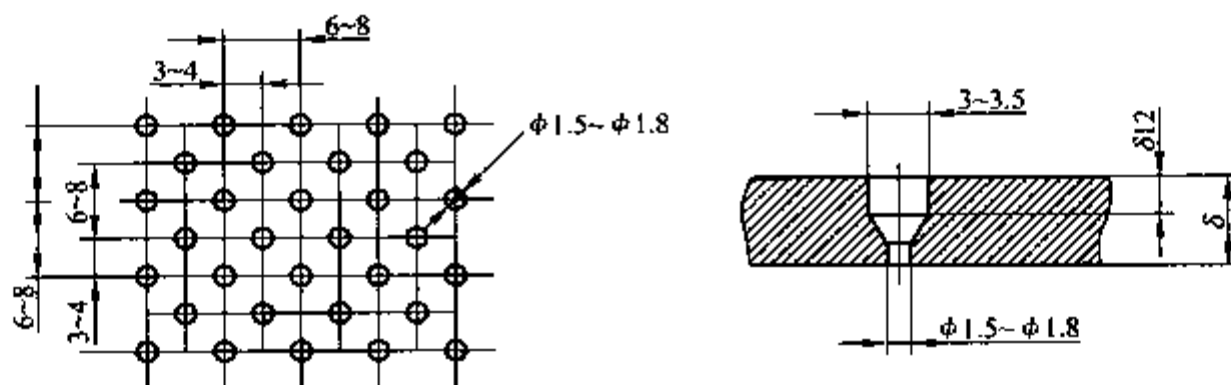


图 4-12 高中频感应器喷水孔分布和孔径

表 4-27 自喷式感应器喷孔直径 (mm)

冷却剂	高频(200~300 kHz)	中频(2.5~8 kHz)
水	0.8~1.2	1.0~1.8
有机聚合物水溶液	1.0~1.5	1.5~2.0

表 4-28 连续加热自喷式感应器孔分布

频率	喷孔间距(mm)	喷孔轴线与工作轴线夹角	备注
高频(200~300 kHz)	1.5~3.5	$25^{\circ}\sim 45^{\circ}$	通常为一系列孔
中频(2.5~8 kHz)	2.0~4.0	$25^{\circ}\sim 45^{\circ}$	一系列或四列孔

## 2. 汇流排与连接板

为减少感抗和电阻,汇流排应尽量减少长度和间距。汇流排间距一般为 1~3 mm。中频感应器的汇流排和连接板可成一体。高频感应器的汇流排和连接板可做成一体,也可做成拆卸式。

## 3. 感应器供水

感应器通电工作时,产生的热量必须用适当流量的水带走。如果使用小规格铜管,需要加大水压,保证一定流量,确保充分冷却。

## 4. 导磁体

导磁体可以减少磁力线的逸散,提高感应器的效率,同时也能改善复杂工件加热时温度的均匀性。感应器采用的导磁体一般有两类:硅钢片和铁淦氧导磁体。导磁体材料及规格应按电源频率选取,见表 4-29。

表 4-29 常用导磁体的种类

电流频率(kHz)	导磁体种类	规格	备注
2.5	硅钢片	每片厚度 0.2~0.5 mm	硅钢片经磷化处理,以保证片间的电绝缘
8	硅钢片	每片厚度 0.1~0.3 mm	
200~300	铁氧体		

硅钢片导磁体常用型号为 D42、D43、D44 等,仅适用于中频和工频电源的感应器。

铁氧体导磁体分中频和高频两类,按一定规格成型,分不可加工、可加工与可塑性三种类型。国外某公司生产的可加工铁氧体导磁体性能较好,其特性见表 4-30。

表 4-30 可加工铁氧体导磁体特性





特 性	基本产品			特殊产品	
	绿	黄	灰	红	黑
产品色彩	绿	黄	灰	红	黑
密度(g/cm <sup>3</sup> )	6.6	6.1	5.9	5.5	4.8
使用频率范围(kHz)	1~50	10~1000	10~3000	10~3000	10~5000
最佳使用频率范围(kHz)	3~30	50~500	50~1000	50~500	100~1000
初始相对磁导率	63	36	16	23	7
最大相对磁导率	120	55	18	28	8
饱和磁通量密度(T)	1.6	1.5	1.0	1.3	0.8
抗温能力(°C)	250(长时间)、300(短时间)				
电阻率(kΩ·cm)	0.5	10.0	>15	>100	>100

对于小直径内孔或形状复杂工件使用铁氧体的感应器,为便于制作和安装,可用铁氧体粉末自制粘结导磁体。需要长时间工作的感应器应注意对导磁体尤其是铁氧体导磁体的冷却,以免温升过大降低效率,甚至失去作用。

### 三、常用中高频感应器举例

常用的各类感应器分别见表 4-31~表 4-34。

表 4-31 常用圆形零件同时加热和轴类零件连续加热淬火感应器

用途	结构图	备注	用途	结构图	备注
例 1: 齿轮、圆盘、小锥角锥齿轮加热淬火		1) 感应器与工件间隙 $a$ : 简单圆柱体 1~3 mm; 齿轮(模数 $m$ ): $m(\text{mm})$ $a(\text{mm})$ 1.5~2    1.5~2 3~3.5    2.5~3 4~4.5    3~3.5 5~6    4~5	例 3: 齿轮、短轴等淬火加热		感应器总长与高度比应大于 5~10;高度不大于 10 mm;匝数不大于 5
例 2: 齿轮、圆盘、短柱、小锥角锥齿轮的加热淬火		2) 感应器最大高度 $h_i$ 与工件直径 $d$ 有关,应不大于以下数值: $d(\text{mm})$ $h_i(\text{mm})$ 14    14 50    20 100    25 100~400    25~30	例 4: 飞轮、齿轮等加热淬火		感应器内壁与工件的间隙参照例 1、2

(续表)


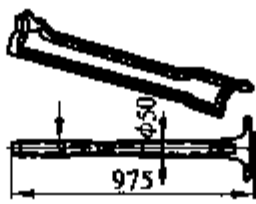



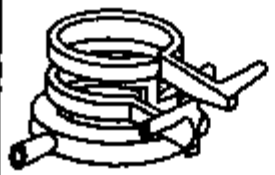


用途	结构图	备注	用途	结构图	备注
例 5: 锥齿轮等 加热淬火		1) 感应器锥角 $\theta_1$ 按齿轮节圆锥角 $\theta_{节}$ 和根圆锥角 $\theta_{根}$ 设计: 当 $\theta_{节} = 30^\circ \sim 90^\circ$ , $\theta_1 = \theta_{节}$ 当 $\theta_{节} = 90^\circ \sim 130^\circ$ , $\theta_1 = \theta_{根}$ 2) 感应圈大端间隙 $a_{大}$ 按齿轮模数 $m$ 设计: $m(\text{mm})$ $a_{大}(\text{mm})$ <3        1.5~2 3~5        2~3	例 8: 半轴纵向 加热淬火		
例 6: 锥齿轮等 加热淬火		1) 感应器内壁与工件的大端间隙 $a_{大}$ 同表中例 5 2) 感应器匝数 $n$ 和高度 $h$ 参照表中例 3	例 9: 轴类(包括花键轴)等淬火		1) 冷却不足时可附加喷水圈 2) 感应器宽度应保证足够的水量
例 7: 锥齿轮等 加热淬火		感应器波数根据齿轮直径大小而定,一般 3~5 个,加热时必须旋转	例 10: 花键轴、 宽齿齿轮 中频淬火		用 PAG 类淬火剂或聚乙烯水溶液淬火时应附加喷水圈冷却
例 11: 滚轮周向 中频淬火			例 11: 滚轮周向 中频淬火		1) 感应器的两回线间距 12~20 mm, 两回线与零件轴线的夹角一般为 $40^\circ \sim 55^\circ$ 2) 感应器与滚道中心的间隙应比两端大

表 4-32 常用曲轴、凸轮轴淬火感应器



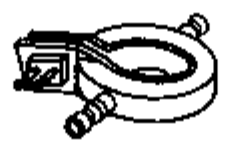


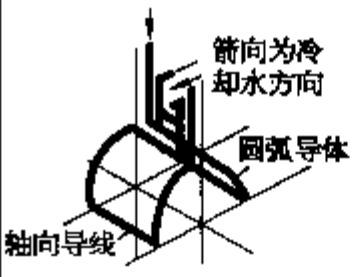
用途	结构图	备注	用途	结构图	备注
例 1: 蜗杆等加 热淬火		感应器波数一般 3~5 个,与工件的间隙 3~5 mm,波峰、波谷应适当外翻,以防蜗杆端面过热,加热时工件应旋转	例 4: 曲轴零 件高频 淬火		1) 感应器与工件的间隙 1~3 mm, 高度 5~8 mm 2) 保证足够水量 3) 两汇流排同时进水自喷冷却 4) 淬火时需夹紧离合夹头
例 2: 凸轮轴、 齿轮、圆 盘等中频 同时加热 淬火		1) 与工件间隙: 圆柱体 2~5 mm 2) 感应器高度: 加热圆柱体,稍大于零件高度;加热凸轮,稍高于凸轮高度 3~6 mm	例 5: 曲轴等 零件中 频淬火		1) 需有宽 2~3 mm、高 2~6 mm 的台阶,它与工件的间隙为 2~3.5 mm 2) 感应器高度等于曲轴颈长 - 2 × 曲轴圆角半径
例 3: 凸轮轴高 频同时加 热淬火		1) 感应圈仿形,但间隙各部分不同;凸轮尖部间隙 4~10 mm,其余部分 2~3 mm,高度 ≤ 30 mm 2) 数控凸轮淬火机床可以是圆环感应器	例 6: 曲轴中 频淬火		1) 加热时曲轴转速 60~100 r/min 2) 实用感应器中还有导磁体、汇流板、外护板、定位块、喷水器等部分

表 4-33 常用零件的平面、球面、端面 and 凹槽表面淬火感应器


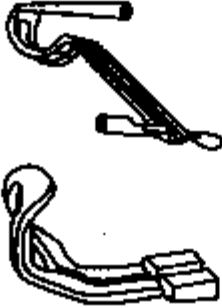


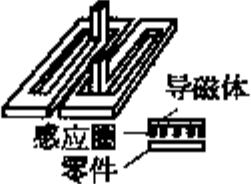
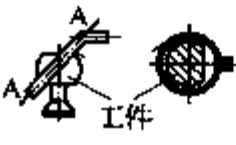

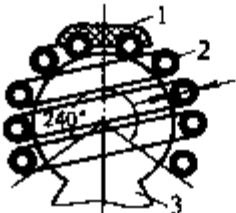
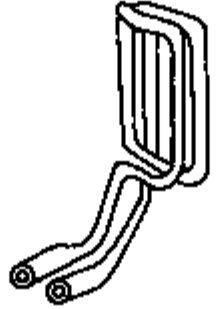

用途	结构图	备注	用途	结构图	备注
例 1: 圆端平面、大锥角锥齿轮等高频同时加热淬火		1) 螺旋圈数依零件加热面大小而定, 一般 2~5 圈, 螺旋线间距常为 3~6 mm 2) 加导磁体提高效率 3) 可辅助喷水冷却或浸冷	例 5: 滚道中频连续淬火		1) 两回线间距 12~20 mm 2) 感应器截面一般 8~18 mm 感应器的半圆端头导线应超出滚道边 1/3~1/2 截面宽 3) 感应器与滚道底间隙 1.5~2.5 mm 4) 感应器高度为截面宽度的一半 5) 可加导磁体增加效率
例 2: 长平面连续加热淬火		1) 两回线间距不小于它与工件的间隙的 4 倍 2) 感应器有效长度小于平面宽(每边 3~4 mm) 3) 感应器高 3~6 mm, 宽 6~12 mm 4) 可加导磁体提高效率	例 6: 滚道、大模数齿轮沿齿沟中频连续淬火		1) 感应器有效部分和导磁体与齿沟仿形, 回线间距 12~20 mm 2) 滚道底部的间隙 1~2 mm, 两侧上部 2~4 mm 3) 齿轮齿根间隙 0.5~1.5 mm, 节圆间隙 1.5~2.5 mm 4) 也可用于埋液淬火
例 3: 较小平面中频同时加热淬火		1) 感应器高 5~12 mm 2) 中间三根导线的间距 2~4 mm, 分布宽度应比受热平面(每边)大 3~6 mm, 与相邻导线间距均应大于 15 mm	例 7: 球面中频淬火(斜置式)		1) 横截面直径大的部分间隙较小, 横截面直径小的部分间隙较大 2) 工件应旋转
例 4: 较长平面中频连续淬火		1) 感应器高度 4~10 mm 2) 两回线间距 12~20 mm 3) 感应器长度应大于淬火面宽, 每边应向外伸出感应器截面宽度 8~18 mm 的 1/3~1/2 倍 4) 两回线间距 12~20 mm 5) 两进水管同时进水, 自喷冷却	例 8: 零件球面螺旋仿形淬火		1) 有效圈与球面的间隙从上往下应渐增, 第一匝 2 mm、第二匝 3 mm、第三匝 4 mm 2) 匝间距离自上而下渐增, 最上一匝加铁氧体

表 4-34 常用齿轮逐齿淬火感应器和内孔表面淬火感应器

用途	结构图	备注	用途	结构图	备注
例 1: 大模数齿轮 ( $m < 15 \text{ mm}$ ) 齿面逐齿高频淬火		1) 与齿面间隙: 节圆部位 1.5~2.5 mm, 节圆以上部位 2.5~4 mm, 齿端大于 10 mm 2) 附加喷水头冷却 3) 用料管径不宜过大 4) 齿根不能淬硬	例 2: 大模数锥齿轮齿面高频淬火		1) 感应圈铜板与齿面仿形, 铜板长度每边比齿宽短 2~3 mm, 节圆处间隙 1~2 mm 2) 可辅助喷水头冷却 3) 齿根不能淬硬

(续表)

用途	结构图	备注	用途	结构图	备注
例 3: 大、中模数 (5 ~ 14 mm) 齿轮齿面高频淬火		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 感应器内壁与齿面间隙: 节圆以上部位 3~5 mm, 近齿根部位 1~2 mm</li> <li>2) 与齿底间隙 1~2 mm</li> <li>3) 与齿顶面间隙 8~25 mm</li> </ol>	例 8: 大模数 (>8 mm) 齿轮沿齿沟中频淬火		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 感应器与节圆部分间隙为 1.5~2.5 mm, 与齿根部位间隙 0.5~1 mm</li> <li>2) 感应器靠齿根部分垂直高度一般 20~30 mm 采用双三角形双回路能增强齿根加热</li> <li>3) 可埋液淬火</li> </ol>
例 4: 大、中模数 (6 ~ 14 mm) 齿轮沿齿沟高频淬火		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 感应器与齿沟仿形, 间隙一般为 1 mm, 与齿面间隙小于 1 mm</li> <li>2) 感应器高度 6~8 mm</li> <li>3) 导磁体高度 10~12 mm</li> <li>4) 加热时感应圈与导磁体(喷水)均应充分冷却(间隙中也充满流水, 可埋液淬火)</li> </ol>	例 9: 浅深度内孔及内齿轮高频同时加热淬火		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 感应器外壁与工件间隙 1~3 mm, 为提高效率应尽可能小</li> <li>2) 孔深小于 15 mm 时可用铜管直接弯制</li> <li>3) 小直径感应器应加导磁体</li> <li>4) 淬火冷却可用附加喷头或浸冷</li> </ol>
例 5: 大、中模数 (5 ~ 12 mm) 齿轮沿齿沟高频淬火		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 感应器与齿面间隙 2~3 mm, 与齿根间隙 0.5~1 mm</li> <li>2) 垂直部分圆形或半圆连接后总高度 8~20 mm</li> <li>3) 淬火冷却除自喷外可采用喷冷相邻两侧面或同时采用</li> </ol>	例 10: 较深内孔高频同时加热淬火		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) <math>\phi 20 \sim \phi 40</math> mm 的内孔用多匝, 与零件间隙 1~2 mm</li> <li>2) <math>20 \text{ mm} &gt; F &gt; 12 \text{ mm}</math> 的小孔采用回线式加导磁体的感应器, 如附图</li> <li>3) 感应器一般 2~5 匝, 匝间距 2~4 mm</li> </ol>
例 6: 大模数 ( $m > 8 \text{ mm}$ ) 齿轮齿面中频连续淬火		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 感应器与齿面各部分间隙: 节圆部分 3~6 mm, 齿根部分 1.5~2.5 mm, 两垂直导线长度 30~45 mm</li> <li>2) 由辅加喷水头进行淬火冷却</li> <li>3) 齿根不能淬硬</li> </ol>	例 11: 较深内孔, 内齿花键孔 (内孔 $\phi > 50 \text{ mm}$ ) 连续淬火		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 外壁与工件间隙 1~2 mm</li> <li>2) 感应器高度 6~12 mm</li> <li>3) 感应器宽度 4~8 mm</li> <li>4) 当内孔深度很大时可采用同心汇流排</li> <li>5) 为提高电效率, 可制成双圈</li> </ol>
例 7: 模数大于 7 mm 的齿轮沿齿沟中频淬火		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 感应器和导磁体与齿沟仿形, 高度一般 10~14 mm, 宽度 4~6 mm</li> <li>2) 固定夹内通水冷却导磁体</li> <li>3) 可用于埋液淬火</li> </ol>	例 12: 直径大于 70 mm 的深孔中频连续加热淬火		<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 外壁与工件间隙 2~3 mm</li> <li>2) 感应器高度 12~16 mm</li> <li>3) 感应器匝间距 8~12 mm</li> <li>4) 采用单匝时高度 14~20 mm, 宽度 9~14 mm, 间隙 2~3 mm</li> <li>5) 可加导磁体提高效率</li> </ol>



## 第四节 感应热处理设备

感应热处理设备主要由感应加热电源装置和淬火机床组成。感应加热的电源装置按频率不同分为超高频、高频、超音频、中频和工频等感应加热电源装置,按变频方式可分为电子管变频、机式变频、固态电路逆变及工频等感应加热电源装置。国内各种变频装置的特性见表4-35。

表4-35 国内常用感应加热电源装置的特性

加热装置类别	频率范围(Hz)	功率范围(kW)	设备效率(%)	热处理应用范围
电子管变频加热电源装置	高频 $10^5 \sim 10^6$	5~500	50~75	脉冲淬火,表面淬火
	超音频 $10^4 \sim 10^5$	5~500	50~75	表面淬火
晶体管变频加热电源装置	高频 $10^4 \sim 10^5$	2~200	75~92	表面淬火
	中频 $5 \times 10^2 \sim 10^4$	100~1 000	90~95	表面淬火,透热热处理
机式变频加热电源装置	中频 $5 \times 10^2 \sim 10^4$	15~1 000	70~85	表面淬火;透热热处理
工频变频加热电源装置	工频 $5 \times 10$	50~4 000	70~90	深层淬火;透热热处理

### 一、高频感应加热电源装置

目前我国生产中使用的高频及超音频感应加热电源装置不少是电子管式变频装置,但现在正被更先进的晶体管高频电源所取代。

#### 1. 电子管式高频电源装置

我国目前生产的电子管式变频器一般由晶闸管调压器、升压变压器、高压整流器和电子管振荡器等构成的主回路及微机控制调压电源系统所组成,大部分产品的效率、稳定性和可靠性已比从前明显提高。它们的主要技术数据见表4-36。

表4-36 电子管式高频、超音频变频装置的型号及主要技术参数

型号	输出功率(kW)	振荡频率(kHz)	冷却水量(L/h)	主要用途	设备组成	设备外形尺寸(mm) 长×宽×高
GP10-C2	8	500~1 000	800	淬火、焊接	振荡柜	800×900×1 500
GP30A-C2	25	200~300	1 500	淬火、焊接	振荡柜 整流柜 变压器	2 200×900×2 000 1 200×900×1 200 1 150×800×1 050
GP60-CR13-2	50	200~300	3 000	熔炼、淬火	振荡柜 整流柜 调压柜	2 200×900×2 000 1 600×1 050×2 000 800×500×1 400
GP100-CM	85	200~300	3 200	淬火、焊接	振荡柜 整流柜 调压柜	2 200×900×2 000 1 600×1 050×2 000 600×400×1 300
GP200-C2	170	50~150	800	淬火、焊接	振荡柜 整流柜 输出柜 输出柜	1 600×2 000×2 200 1 600×2 000×1 800 600×670×1 500 600×670×1 500

(续表)

型号	输出功率(kW)	振荡频率(kHz)	冷却水量(L/h)	主要用途	设备组成	设备外形尺寸(mm) 长×宽×高
CHYP60-C2	50	30~40	3 500	淬火、焊接	振荡柜 输出柜	1 100×800×2 000 600×600×1 200
CHYP100-C2	85	30~40	3 500	淬火、焊接	振荡柜 输出柜	1 100×800×2 000 600×600×1 200
CHYP100-C3	85	30~40	4 000	淬火、焊接	振荡柜 整流柜 配电柜 调压柜 输出柜	2 200×900×2 000 1 600×1 050×2 000 1 000×500×2 000 600×400×1 300 600×600×1 200
GGC80	80	200~300	150 L/min	淬火、焊接	振荡柜 整流柜	2 100×800×1 900 1 500×1 200×1 000

## 2. 晶体管式高频变频装置

随着全控型半导体电子电力器件(如 MOSFET、IGBT 等)的出现,开关频率、功率、耐压、效率的提高和通断压降(功耗)、体积的减少,晶体管式高频变频装置逐渐替代了寿命短、效率低、负载稳定性差的电子管高频电源装置。晶体管式高频变频装置具有很多优点,如体积小,重量轻(分别为原来的 1/2 和 1/3),整机效率高达 75%,节能 30%以上,节水 60%以上,而且随时可启动和停机,输出功率调节方便,反应快而精确,可靠性高,故障率低,整体使用寿命长。各种感应加热电源装置的一些性能比较见表 4-37。

表 4-37 各种感应加热电源装置的一些性能比较

项 目 \ 装置种类	机械式	电子管式	晶闸管式	晶体管式
频率(kHz)	1~10	20~500	0.5~10	10~200
单机容量(kW)	10~600	2~500	10~1 000	2~200
频率变动	恒定	因自激振荡变动	1) 恒定 2) 变动	1) 恒定 2) 变动
功率调整	励磁电压 输出电压	阳极电压	1) 直流电压 2) 频率	1) 直流电压 2) 直流电流
功率转化效率(%)	70~83	65~70	75~92	75~92
易损件	轴承	真空管	没有	没有
冷却水耗量	多	多	少	少
并联运行	能	不能		
修理时间	长	短	短	短
占地面积	多	多	少	少
硬化层深度范围(mm)	30~10	0.5~3	3~10	0.5~3

晶体管式高频变频装置由整流器、逆变器和控制电路组成。由于所使用的电子电力器件及生产厂商不同,晶体管式高频变频装置有多种型号。20 世纪 90 年代我国开始生产 SIT 器件的高频电源,现已基本被货源更广的 MOSFET 器件或 IGBT 器件的高频电源所取代。HKTP 型(IGBT)和 HKSP 型(MOSFT)的规格见表 4-38。

表 4-38 HKTP 型(IGBT)和 HKSP 型(MOSFET)晶体管高频加热电源规格

型 号	项 目	输入电压 (V)	输出功率 (kW)	振荡频率 (kHz)	冷却水量 (L/h)	冷却水压 (MPa)	外形尺寸(mm) (长×宽×高)
HKSP-X25 kW/100-400 kHz		3 相 380	25	100~400	2	0.4	750×850×1 700
HKTP50 kW/100-400 kHz		3 相 380	50	100~400	3	0.4	750×850×1 700
HKTP75 kW/100-400 kHz		3 相 380	75	100~400	4	0.4	1 700×850×1 800
HKTP100 kW/100-400 kHz		3 相 380	100	100~400	5	0.4	1 700×850×1 800
HKTP150 kW/100-400 kHz		3 相 480	150	100~400	6	0.4	1 700×850×1 800
HKTP200 kW /100-400 kHz		3 相 480	200	100~400	8	0.4	1 800×850×1 800
HKTP250 kW /100-400 kHz		3 相 540	250	100~400	10	0.4	1 800×850×1 800

注:全集成数字化控制,相序自动识别,多重故障诊断,水温及运行工况全程 PLC 监控,积木式安装结构。

## 二、中频感应加热电源装置

中频感应加热电源装置有机式、晶闸管式和晶体管式三种。

### 1. 机式中频变频装置

机式变频装置能把 50 Hz 工频电流转换成 250~10 000 Hz 的中频电流,它的整机效率为 70%~85%,低于晶闸管和晶体管式变频装置,但使用维护简单可靠,维护费用低。数台相近性能的变频装置可并联或单独使用。它的主要缺点是使用时调谐匹配较麻烦,运转时噪声较大。

机式中频变频装置基本上由机式变频机组、控制启动柜、电容器柜、配电柜、内外控制台及淬火变压器等组成。

1) 机式中频变频机组 该机组是一台共轴的电动机和发电机合成的机组。目前国内生产的大多数是立式水冷机组。大功率(250 kW 以上)采用内冷式冷却。

2) 励磁及电压自动调节 目前国产的中频变频机组采用晶闸管自动调压励磁电路,克服了加热过程中因负载参数和电源电压的波动所引起的输出电压变化,达到更稳定的加热效果。

3) 淬火变压器 为了使用时的调谐匹配和安全,变频器与感应器之间需加接一个淬火变压器。变压器的次级往往是 1 匝(也有两匝和三匝的)。大量生产中一次侧线圈可固定不变,但需要经常变更负载时可采用盘式可变匝比变压器,根据匹配需要可改变接头,从而改变一次侧的线圈匝数。淬火变压器一般由变频器厂商配套供应。

4) 中频电容器与匹配调谐 由于中频变频机的输出是频率固定的电流,负载是由变压器和感应器所组成的感性负载,故在操作中必须对具体的零件及其感应器选择合适的淬火变压器匝比和电容量以获得较高的功率因数和输出功率。新产品 RFM 全膜电容器比一般的中频电容器容量至少增加三倍,但质量却减少 30%,体积也大大缩小,现已经大量使用。

### 2. 晶闸管式中频变频装置

晶闸管中频变频装置比中频发电机组效率高、质量轻、占地面积小、运行噪声小,且启动、停止便捷,能自动跟踪频率使其保持最佳的运行状态,因而受到广泛的应用。表 4-39 为几种国产晶闸管式变频装置的规格。

表 4-39 几种晶闸管式变频装置的规格

型 号	项 目	输入电压 (V)	输出功率 (kW)	振荡频率 (kHz)	冷却水量 (L/h)	冷却水压 (MPa)	外形尺寸(mm) (长×宽×高)
KGPS50 kW/1-10 kHz		3~380	50	1~8	3	0.4	850×850×1 700
KGPS100 kW/1-10 kHz		3~380	100	1~8	4	0.4	850×850×1 700
KGPS160 kW/1-10 kHz		3~380	150	1~8	5	0.4	1 700×850×1 800
KGPS200 kW/1-8 kHz		3~380	200	1~8	6	0.4	1 700×850×1 800

(续表)

型 号	项 目	输入电压 (V)	输出功率 (kW)	振荡频率 (kHz)	冷却水量 (L/h)	冷却水压 (MPa)	外形尺寸(mm) (长×宽×高)
KGPS250 kW/1-8 kHz		3~480	250	1~8	8	0.4	1700×850×1800
KGPS350 kW/1-8 kHz		3~480	350	1~8	12	0.4	1700×850×1800
KGPS400 kW/1-8 kHz		3~540	400	1~8	16	0.4	1700×850×1800
KGPS500 kW/1-8 kHz		3~700	500	1~8	18	0.4	1700×850×2000
KGPS750 kW/1-8 kHz		3~700	750	1~8	25	0.4	2400×850×2000
KGPS1000 kW/1-6 kHz		3~540	1000	1~6	30	0.4	3200×850×2200
KGPS1250 kW/1-6 kHz		3~700	1250	1~6	35	0.4	3200×850×2200
KGPS1500 kW/1-4 kHz		3~700	1500	1~4	40	0.4	4000×850×2200
KGPS2000 kW/1-2.5 kHz		3~700	2000	1~2.5	50	0.4	5600×850×2200

晶闸管中频变频装置主要由整流、滤波、逆变、控制及保护等电路组成,是一种使用较稳定的很经典的晶闸管中频感应加热电源。

为了适应数控淬火机床或生产自动线稳定可靠的工作,也有厂商配置全集成数字化控制线路、恒反压逆变控制系统、运行工况全程 PLC 监控、多重智能式故障诊断、冷却水监控等系统的;并采用积木式模块安装结构。

### 三、超音频感应加热电源装置

我国目前生产的超音频(10~100 kHz)变频装置还有不少是采用电子管式的。它与高频电子管式加热装置的原理和组成相同,只是主控电路的电感和电容有些不同。20世纪80年代起渐渐被新的电子电力器件绝缘门极双极晶体管(IGBT)超音频变频装置所取代。部分国产的 IGBT 晶体管式超音频变频装置的规格见表4-40。

表 4-40 HKTP 型(IGBT)晶体管电源

型 号	项 目	输入电压 (V)	输出功率 (kW)	振荡频率 (kHz)	冷却水量 (L/h)	冷却水压 (MPa)	外形尺寸(mm) (长×宽×高)
HKTP50 kW/1-100 kHz		3~380	50	1~100	2	0.4	750×850×1700
HKTP100 kW/1-100 kHz		3~380	100	1~100	3	0.4	750×850×1700
HKTP160 kW/1-100 kHz		3~380	150	1~100	4	0.4	1700×850×1800
HKTP200 kW/1-50 kHz		3~380	200	1~50	5	0.4	1700×850×1800
HKTP250 kW/1-50 kHz		3~480	250	1~50	6	0.4	1700×850×1800
HKTP350 kW/1-50 kHz		3~480	350	1~50	8	0.4	2700×850×2200
HKTP400 kW/1-50 kHz		3~540	400	1~50	12	0.4	2700×850×2200
HKTP500 kW/1-50 kHz		3~580	500	1~50	16	0.4	2700×850×2200
HKTP800 kW/1-50 kHz		3~700	800	1~50	20	0.4	3600×850×2200

注:全集成数字化控制,有频率自动扫描跟踪和相序自动识别、冷却水温监控系统,积木式和模块化安装结构,是中频、超音频一体化的电源。

IGBT 晶体管式超音频变频装置由可控桥式整流器、逆变器和控制保护电路等组成。它的整流电路和逆变电路与晶体管式高频变频装置基本相同。

#### 四、工频感应加热电源装置

工频感应加热毋需变频装置,设备简单,输出功率的整机效率高,电流穿透层达 70 mm。适用于冷轧辊、柱塞、大车轮等大截面零件表面淬火加热,但加热速度和功率因数均较低(需大功率补偿电容),所以表面淬火和透热加热一般选择中频电源装置。

工频感应加热供电线路主要由电源变压器、功率补偿电容器、工频感应器、电流保护装置及检测仪表控制线路等组成。采用元件供应较广泛。有时为了使用不带铁心的感应器,在线路中加接低压水冷调压变压器。

#### 五、感应淬火机床

感应热处理要实现机械化自动化,既要达到处理件的质量稳定一致,又要减轻劳动强度、改善作业条件,必须配备相应的淬火机床。直到 20 世纪 70 年代后期,国内感应淬火机床中的大部分由用户根据需要自行设计制造,尤其是用于大件感应淬火的机床,并未形成系列化产品。从 20 世纪 80 年代起,一些厂商从国外引进了先进的淬火机床、控制技术及其器件,在消化吸收引进技术的基础上开发了一些可编程序控制器(PLC)和微电脑全控(CNC)的先进淬火机床,正在逐步形成系列。随着感应热处理的设备制造业不断发展,传统的设备有向通用设备柔性化和淬火自动线发展的趋势。淬火机床的传动系统广泛应用滚珠丝杠、滚动拖板和直线导轨,旋转速度与位移采用伺服数控或变频调速等技术。这样的配置使淬火机床的移动速度均匀、定位精确、重复精度高,能适应多方面要求。

##### (一) 淬火机床的选择

设计或选用的淬火机床应满足一定的使用要求和技术参数。

##### 1. 使用要求

它直接与生产技术经济指标相关。通用淬火机床应能处理轴类、齿轮等常见感应淬火件,要求定位准确,移动与传动速度稳定可靠,调整方便,操作便捷;维护简单,工作安全;生产效率高,而且节能。在大量生产中,为提高生产率和电源利用率,可选用多工位、自动线结构。在全自动淬火机床中通常采用包括机器人在内的上、下料结构。

##### 2. 技术参数

为了适应处理件的技术要求,对机床的功能及其控制器件有一定要求。

(1) 工件转速  $n(\text{r}/\text{min})$ 。为使圆型工件加热均匀,一般旋转速度采用 30~200 r/min。对于一些齿轮和花键轴,工件的转速要兼顾加热和冷却的实际效果。同时加热淬火时,常用转速  $n=600/t$ ,式中  $t$  为加热时间(s);连续加热淬火时,为防止螺旋软带,一般采用工件每移动 1 mm 回转一周,即  $n=60v$ ,式中  $v$  为工件相对移动速度(mm/s)。对齿轮和花键轴类工件的转速应使其外圆线速度不大于 500 mm/s。

(2) 工件相对移动速度  $v(\text{mm}/\text{s})$ 。一般淬火时,相对移动速度为 2~30 mm/s,快速移动为该速度的 3~5 倍。它取决于加热的比功率和感应器的高度,即  $v=H/t$ ,式中,  $H$  为感应器的高度(mm);  $t$  为加热所需时间(s)。连续加热淬火时常用移动速度为 0.8~25 mm/s。

(3) 淬火机床的精度。淬火机床的精度通常低于机械加工机床,一般规定主轴锥孔径向跳动、回转工作台面的跳动量和顶尖连线对滑板移动的平行度(在夹持长度小于 2 000 mm 时)均为 0.3 mm,工件进给速度的变化量  $\pm 5\%$ 。随着近几年来对感应热处理的技术要求不断的提高,对淬火机床的要求也相应提高,在和制造企业协商时,一般确定在小于 0.1 mm 这一等级。

(4) 淬火介质管路直径  $D(\text{mm})$ 。计算淬火介质管路直径时,应考虑淬火设备能同时淬火的最大面积( $\text{cm}^2$ )、不同淬火条件需求的喷淋密度。一般的表面淬火,喷淋密度为 0.01~0.015 L/(s· $\text{cm}^2$ );透热淬火为 0.04~0.05 L/(s· $\text{cm}^2$ );低淬钢淬火为 0.1 L/(s· $\text{cm}^2$ )。淬火介质管路直径  $D \approx 3.57 \sqrt{SM/v}$ ,式中  $S$ 、 $M$  和  $v$  分别为淬火介质的喷淋面积( $\text{cm}^2$ )、喷淋密度[L/(s· $\text{cm}^2$ )]和介质在管路中的流速(m/s),(一般取 1 m/s)。淬火介质的排出口径取决于喷淋持续时间,一般大于进液管的 1~2 倍。

(5) 中频淬火变压器型号。对于通用淬火机床宜用多匝比中频淬火变压器,它的容量最好是发电机容量的 3 倍。

(6) 中频电容器功率。淬火机床应按下式计算确定需配置电容器:  $P_{\text{容}} = P_{\text{发}}(1/\cos \varphi + 0.5)(\text{kVA})$ ,

式中  $P_{\text{容}}$ 、 $P_{\text{发}}$  和  $\cos \varphi$  分别为中频电容器功率、中频机组的额定功率(kW)和功率因素(有淬火变压器时)。当频率 8 000 Hz 时,  $\cos \varphi=0.2 \sim 0.3$ ; 当频率 2 500 Hz 时,  $\cos \varphi=0.3 \sim 0.5$ ; 当频率 1 000 Hz 时,  $\cos \varphi=0.4 \sim 0.6$ 。

### 3. 工艺参数测试及程序控制

感应淬火的设备,除电源装置的控制台有多种电参数测试仪表外,淬火机床的控制台上也应有工件的转速、位移及速度的测试表和相应的调节器件;冷却介质的管路上应有压力表、流量表和相应的调节器件,以便手动或自动调控相关的工艺参数,保证对处理件的质量有效地进行过程控制。关于温度的测控,除了有几个企业的大型冷轧辊双频感应淬火的设备使用红外线光导纤维测温、微机闭环控温外,对于其他技术要求高、尺寸小、加热时间较短的工件,一般采用能量监控器,以监控电源输出的能量,使受热工件适时加热,保证设备在不同的工况下(特别当电网电压波动时)工件均能得到合格的淬火质量,同时又对所设定的参数进行过程监控,显示有关工艺曲线和数据。

随着技术进步,淬火机床的控制器件也在升级换代,越来越多的设备采用数控系统与变频调速系统实现感应器定位与扫描,并通过可编程序控制器与电源联机,实现全自动化生产,可按预编程序使处理件的质量进一步提高。

### 4. 特殊要求

工作中的感应器处于交变磁场中,因此淬火机床上的机构要与其保持一定的距离;由于工件加热的温度、淬火时的水雾及油烟对机床的影响,轴承及转动、滑动等部件需有防水防腐措施;为防机床中的电动机遭水淹或受潮,需设防水挡板和上、下水道;在淬火机床上应有防淬火液外溅的挡板和淬火液的雾气和油烟的脱排装置,以保证操作人员的劳动环境符合环保标准。

## (二) 常用感应淬火机床规格

### 1. 立式数控感应器扫描淬火机床(HKVC型,规格见表 4-41)

这类淬火机床适用于各种轴类、盘壳零件的连续扫描、分段扫描加热或同时加热淬火、分段同时加热淬火,是大件中频、超音频淬火的首选。机床分单轴、双轴和三轴等多种系列。机床由底座、床身、主轴系统、上下顶尖、负载滑台、滚动丝杠传动付等组成,采用数控系统和变频调速系统实现感应器定位与扫描,并通过 PLC 与电源联机,实现全自动化生产。

表 4-41 HKVC 型淬火机床规格

型 号	夹持长度 (mm)	工件直径 (mm)	工件质量 (kg)	淬火长度 (mm)	扫描速度 (mm/s)	外形尺寸(mm) (长×宽×高)	
HKVC50	520	600	500	500	工进速度 0~20	1 600×1 650×1 800	
HKVC80	820			800		1 600×1 650×2 000	
HKVC100	1 050	400	800	1 000		1 600×1 650×2 200	
HKVC120	1 250			1 200		1 600×1 650×2 400	
HKVC150	1 550			1 500		1 600×1 650×2 600	
HKVC200	2 050	160	1 000	2 000		快进速度 30~1 000	1 800×1 850×3 100
HKVC250	2 550			2 500			1 900×1 850×3 700
HKVC300	3 050	120	1 000	3 000			2 150×2 200×4 250
HKVC350	3 550			3 500			2 800×2 200×4 800

### 2. 立式数控工件扫描淬火机床(HKVP型,规格见表 4-42)

这类淬火机床适用于轴类零件的连续扫描、分段扫描加热或同时加热淬火、分段同时加热淬火,是小件高频淬火的首选。机床分单轴、双轴两种系列。机床由底座、床身、主轴旋转系统、上下顶尖、工件移动拖台、滚动丝杠传动付等组成,采用数控系统和变频调速系统实现工件定位与扫描,并通过 PLC 与电源联机,实现全自动化生产。

表 4-42 HKVP 型淬火机床规格

型 号	夹持长度 (mm)	工件直径 (mm)	工件质量 (kg)	淬火长度 (mm)	扫描速度 (mm/s)	外形尺寸(mm) (长×宽×高)
HKVP50	520	400	100	500	工进速度 0~20	1 600×1 250×2 000
HKVP80	820			800		1 600×1 250×2 300
HKVP100	1 050	300	75	1 000		快进速度 30~1 000
HKVP120	1 250			1 200	1 600×1 450×3 200	
HKVP150	1 550			1 500	1 600×1 450×3 800	

## 3. 卧式数控工件或感应器扫描淬火机床(HKHP 型,规格见表 4-43)

这类淬火机床适用于各种长轴类零件的连续扫描、分段扫描加热或同时加热淬火、分段同时加热淬火。机床由底座、床身、工件旋转卡盘、床头、尾座、滚动丝杠传动付、负载移动导轨等组成,采用数控系统和变频调速系统实现感应器定位与扫描,并通过 PLC 与电源联机,实现全自动化。

表 4-43 HKHP 型卧式淬火机床规格

型 号	夹持长度 (mm)	工件直径 (mm)	工件质量 (kg)	淬火长度 (mm)	扫描速度 (mm/s)	外形尺寸(mm) (长×宽×高)
HKHP100	1 050	200	1 000	1 000	工进速度 0~20 快进速度 30~1 000	2 600×1 850×1 800
HKHP120	1 250			1 200		2 800×1 850×1 800
HKHP150	1 550			1 500		3 000×1 850×1 800
HKHP200	2 050			2 000		3 500×1 850×1 800
HKHP250	2 550			2 500		4 000×1 850×1 800
HKHP300	3 050	160	3 000	4 550×1 800×2 000		
HKHP500	5 050		5 000	6 500×1 800×2 200		

## 4. 大型轴类、齿轮、滚道和导轨等专用数控淬火机床(表 4-44)

这类淬火机床大多由使用单位定制。除表 4-44 外,国内也有数家专业设备厂能提供半轴、曲轴、凸轮轴等自动化淬火机床、多工位淬火机床与 PC 钢棒感应淬火、回火等自动化生产线等成套设备。

表 4-44 国内专业设备厂生产的部分专用淬火机床规格型号

型号或规格	参 数	冷却方式	主要用途
GCK21900 数控导轨扫描淬火机床 (感应器移动)	淬火长度(mm) 9 000 淬火最大长度(mm) 300 淬火速度范围(mm) 150~600 立柱快速移动速度(mm) 100~1 000 横梁在立柱导轨上、下移动距离(mm) 1 000 变压器在横梁上移动距离(mm) 1 500	喷淋	导轨淬火
多功能数控淬火机床(感 应器移动)	最大工件直径(mm) 4 000 最大工件长度(mm) 1 500	喷淋	内外齿圈、滚道、回转支 承、直斜齿齿轮与齿轴等
大型立式轴类数控淬火机 床(感应器移动)	最大工件长度(mm) 4 000 最大回转直径(mm) 750	喷淋	大型轴类、轧辊等
大型多功能数控淬火机床	齿轮最大直径(mm) 6 500 轴类最大长度(mm) 2 000	喷淋	轴、直斜齿齿轮、大型半 体齿圈、车轮、链轮等

## 第五节 感应热处理件的质量检验、 常见缺陷及预防措施

### 一、感应热处理件的质量检查内容

#### 1. 外观

工件表面不得有淬火裂纹(可通过磁粉探伤、着色探伤或其他无损检测方法检测)、锈蚀、灼伤和影响使用性能的伤痕与缺陷。

#### 2. 表面硬度

工件表面淬火后的硬度应满足图样标注的技术要求,表面硬度波动范围应符合表 4-45 的规定。

表 4-45 感应加热淬火件硬度允许误差

工件类型	表面硬度波动范围(不大于)HRC			
	单 件		同 一 批	
	≤50	>50	≤50	>50
重要件	5	4	6	5
一般件	6	5	7	6

#### 3. 有效硬化层深度

应用硬度法测量有效硬化层深度,其方法参照 GB/T5617《钢的感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度的测定》。

(1) 形状简单的工件有效硬化层波动范围应符合表 4-46 规定。

(2) 形状复杂的大工件的有效硬化层波动范围可协商后适当放宽。

(3) 硬化区域的偏差范围应在技术要求规定的范围内。

#### 4. 显微组织

中碳及其合金结构钢表面感应淬火后的显微组织按 JB/T9204—1999《钢件感应淬火金相检验》测定马氏体级别:3~7 级为合格组织;1~2 级是粗马氏体和较粗马氏体,说明淬火温度偏高;8~10 级,组织中除微细马氏体外,还有托氏体和未溶铁素体,说明加热温度偏低。

#### 5. 畸变

表面感应淬火的工件畸变量一般比炉内整体加热淬火的要小,但畸变量也不应影响以后的机加工和使用要求。

表 4-46 感应加热表面淬火有效硬化层波动范围 (mm)

有效硬化层深度	深度波动范围	
	单 件	同 一 批
≤1.5	0.2	0.4
1.5~2.5	0.4	0.6
2.5~3.5	0.6	0.8
3.5~4	0.8	1.0

### 二、感应热处理件的常见缺陷及预防措施

#### 1. 硬度不足

产生硬度不足的原因有两个:加热不足或冷却不足。

1) 加热不足 比功率偏低、加热时间不足、感应器与工件表面间隙偏大,造成淬火温度偏低,组织中有较多未溶铁素体。

2) 冷却不足 加热结束后延时过长再冷却、喷液时间过短、喷射压力和喷射密度过低及淬火介质冷却速度低等均会造成冷却不足,使组织中出现托氏体等非马氏体组织。



## 2. 软点

喷水孔局部堵塞或分布过稀,导致工件局部区域冷却不足而出现软点。

## 3. 软带

轴类零件连续加热淬火,有时会出现黑白相间螺旋形软带或沿工件与感应器的相对运动方向的某一区域出现直线黑带。这些区域中存在未溶铁素体或托氏体组织。原因如下:

- (1) 喷水角度偏小,加热区返水。
- (2) 工件旋转速度与工件或感应器移动速度不协调,工件旋转一圈感应器相对移动距离偏大。
- (3) 喷水孔角度不一致,工件在感应器内偏心旋转。

## 4. 淬火裂纹

感应淬火裂纹的形成原因和预防措施见表 4-47。

表 4-47 感应淬火裂纹的形成原因和预防措施

序号	淬火裂纹形成原因	预防措施
1	过热,如轴端裂纹、齿面弧形裂纹、齿顶延伸到齿面裂纹	降低比功率,减少加热时间,增大感应器与工件的间隙,同时加热时降低感应器高度
2	冷却过于激烈	采用冷速较缓慢的淬火介质,降低喷液供给量和喷液压力
3	钢材的碳质量分数较高,如 $w_c \geq 0.5\%$ ,开裂倾向急剧增加	精选碳量,使 45 钢中的碳控制在下限,采用冷速较缓慢的淬火介质
4	工件表面沟槽、油孔使感应电流集中	用铁屑堵塞或镀铜
5	未及时回火	及时回火或采用自回火

## 5. 畸变

感应淬火多数表现为热应力型畸变,为此应减少热量向工件内层中的传递。为减少畸变,通常采用透入式加热,提高比功率,缩短加热时间;轴类零件采用旋转加热,齿轮内孔加防冷盖,减少内径缩小;薄壁齿轮淬火时对内孔喷水加速冷却以控制内径胀大。

## 6. 硬化区分布不合理

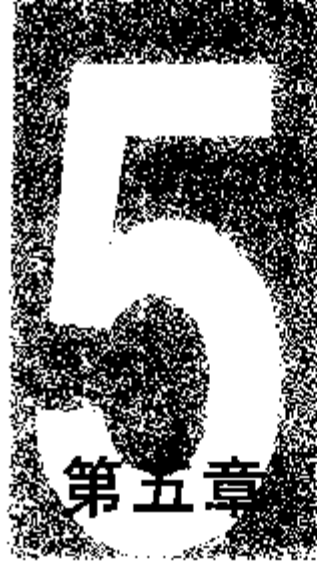
淬硬区与非淬硬区的交接部位恰在工件的应力集中处,如花键轴的花键末端、齿轮的齿面与齿根的交接处、半轴法兰盘与轴的圆弧过渡区以及零件中的沟槽的交接面部位,由于这些地方存在残留拉应力峰,同时服役中又是结构上脆弱部位,容易产生断裂。为此可采取一些措施,使硬化区离开应力集中的危险断面 6~8 mm 或对截面过渡的圆角也实施淬火。

## 7. 硬化层过厚

要求高硬度且经受冲击载荷易断裂的较小零件(如小模数齿轮),硬化层过厚是不利的。为此选材上可用低淬透性钢或在工艺上采用较高的电源频率和比功率,适当减小感应器与工件的间隙,缩短加热时间,减少硬化层厚度。

## 8. 表面灼伤

由于感应器与工件接触短路,使工件表面打弧留下烧伤痕迹和蚀坑。为此,应注意工件内应力和预先处理状况(清除铁屑等)、淬火机床精度、感应器刚性以及与工件间的间隙。



## 第五章

# 控制(可控)气氛热处理

## 第一节 控制气氛基础知识

### 一、几个物理量及相关定律

#### 1. 气体的密度

单位体(容)积气体的质量称为该气体的密度,单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。气体密度受压强和温度影响。常见气体的密度见表 5-1。

气体的密度与温度的关系式:

$$\gamma_T = \gamma_0 T / (T + 273)$$

式中  $\gamma_T$ ——温度  $T$  时的气体密度;  
 $\gamma_0$ ——标准状态时气体的密度;  
 $T$ ——气体的实际温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

表 5-1 常见气体的密度表

气 体	化学符号	分 子 量	密度 <sup>①</sup> ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	相对密度 <sup>②</sup>
空 气		28.97 <sup>③</sup>	1.293	1.000
氧 气	$\text{O}_2$	32.00	1.429	1.105
氮 气	$\text{N}_2$	28.01	1.250	0.968
氢 气	$\text{H}_2$	2.02	0.090	0.070
氩 气	Ar	39.95	1.784	1.380
氦 气	He	4.00	0.179	0.138
一氧化碳	CO	28.01	1.250	0.967
二氧化碳	$\text{CO}_2$	44.02	1.965	1.520
氨 气	$\text{NH}_3$	17.03	0.760	0.588
甲 烷	$\text{CH}_4$	16.04	0.716	0.552
丙 烷	$\text{C}_3\text{H}_8$	44.04	1.968	1.522
二氧化硫	$\text{SO}_2$	64.06	2.860	2.212

注: ① 在标准状态下温度  $0^{\circ}\text{C}$ , 压强  $0.101325\text{ MPa}$ (760 mmHg);

② 以空气为 1 时的气体相对密度;

③ 空气是多种气体的混合物, 这里是其混合物的平均分子量。

#### 2. 气体的压强

气体的压力是气体分子力的宏观表现。作用于单位面积上的气体压力,即为气体的压强。最简单经典的测量压强的仪器是充有水银(汞, Hg)或其他液体(如水)的 U 形管压强计。这个压强值称为表压强。表压强与大气压强之和为绝对压强。在实际应用中压强的单位有多种,它们之间的换算参阅第二章表 2-3。

气体的压强与温度和体(容)积之间的关系式:

$$P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$$

式中  $P$ ——气体压强;  
 $V$ ——气体的体(容)积;  
 $T$ ——气体的绝对温度;  
 下标数 1 和 2——两种不同状态的条件。

### 3. 气体扩散

气体是由无数个不断快速运动的分子组成,气体分子具有较高的动能。这种两种或以上的不产生化学反应的气体置于同一容器内,不需要借助于外力就能均匀地散布于空间的现象,就称为气体的扩散。每种气体分子的扩散速率与该气体分子的运动速度成正比。在同温同压时两种不同的 a 和 b 气体,其分子平均运动速度的比值,与其分子量的平方根成反比,即

$$V_a/V_b = \sqrt{(M_b/M_a)}$$

式中  $V$ ——分子平均运动速率;  
 $M$ ——分子量。

### 4. 道尔顿分压定律

对于理想气体的混合物,其总压强等于各组分气体分压强之和,即

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n$$

式中  $p$ ——混合气体的总压强;  
 $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ ——各组分的分压强。

### 5. 阿弗加德罗常数

在相同的温度和压强下,相同体积的不同气体含有相同数量的分子。1 mol(克分子)任何气体中包含有  $6.02 \times 10^{23}$  个气体分子。在  $0^\circ\text{C}$  和  $0.101\,325\text{ MPa}$ , 1 mol 气体占有的空间为 22.4 L。

### 6. 柏努利定律

气体所具有的能量有三种:位能、动能和静压能。它们可以相互转换,且守恒。可用柏努利方程式来表示:

$$p + \rho gh + \rho v^2/2 = \text{恒量}$$

式中  $p$ ——气体静态压强;  
 $\rho$ ——气体密度;  
 $g$ ——重力加速度;  
 $h$ ——高度;  
 $v$ ——气体流速。

### 7. 用气量

炉子的用气量也称为炉子气体消耗量。在日常生产中炉子的用气量是套用现有同类型炉子的数据,酌情增减而选定的。也有根据自己的经验来确定炉子的换气次数。对于新设计的炉子,常常需要进行理论计算。推荐下列计算式供参考:

1) 输送带式炉 这类炉子(如网带炉、铸链带炉和振底炉等)的特点是连续式操作,一端的炉门经常开启一定的高度,另一端则用淬火液密封。炉气从开启的炉门排出。为保持炉内气氛稳定,炉外空气不会从开启着的炉门进入炉内。通过炉门流出的气流,其自由表面要紧贴炉门框(或输送带水平面)。用气量的计算如下式:

$$\omega = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{3}} \times B \times H \phi \sqrt{2gH \frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma}}$$

式中  $\omega$ ——通过开启着的炉门流出的气体流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  
 $B$ ——炉门宽度(m);

- $H$ ——炉门开启高度(m);  
 $\phi$ ——气体流出阻力系数(一般选取 0.85~0.90);  
 $g$ ——重力加速度;  
 $\gamma$ ——气体密度;  
 $\gamma_1$ ——空气的密度。

将计算结果再折算成小时标准状态的气体流量  $Q$ :

$$Q = 3600\omega \times 273 / (T + 273) \quad (\text{标准 m}^3/\text{h})$$

2) 滚筒炉 滚筒炉带有一个常开的加料口,开口向上,在一个水平面上。用气量计算如下式:

$$Q = \mu F \sqrt{2gH \frac{\gamma_1 - \gamma}{\gamma}}$$

- 式中  $Q$ ——通过加料口流出的气体流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  
 $F$ ——加料口的面积( $\text{m}^2$ );  
 $\mu$ ——加料口的冒气系数(可取 0.9);  
 $H$ ——加料口平面到炉底的距离(m);  
 $g$ ——重力加速度;  
 $\gamma$ ——气体的密度;  
 $\gamma_1$ ——空气的密度。

计算结果折算成小时标准状态的气体流量参照输送带式炉。

3) 推杆炉 推杆炉带有进料前室。前室除了外炉门,在前室与加热室之间还有一中间炉门,它不像外炉门那样密封,加热室中的气氛气体可以从这道门的缝隙,流到前室。因此前室中也是充满保护气氛。进料时,外炉门开启,装满工件的料盘被推进前室,关闭外炉门,等待一段时间后,由加热室流出的气氛气体将进料时进入前室的空气赶走,再开启中间炉门,将料盘推入加热室。这样就保证加热室的气氛不受干扰。推杆炉有贯通式和多室式。带有前室的辊底炉等也属此类。用气量可按式进行计算:

$$Q = 4.5V/t$$

- 式中  $Q$ ——保证带有装料前室的推杆炉内气氛稳定的用气量(标准  $\text{m}^3/\text{h}$ );  
 $V$ ——装料前室的有效容积( $\text{m}^3$ );  
 $t$ ——中间炉门两次开启的间隔时间(h)(也就是进料周期)。

4) 箱式炉 箱式炉是热处理作业中使用很普遍的炉型,是周期操作的炉子。炉膛容积相对较小,其炉门相对较大。当炉门开启瞬间,炉内气氛气体即可散逸光。尤其是没有火帘,没有前室的炉子。当装完工件时炉内即充满了空气。所幸此时工件的温度尚低,炉子升温使工件到达开始脱碳的  $650^\circ\text{C}$  温度,还需要一段时间。如果在工件温度到达  $650^\circ\text{C}$  之前充入足够的气体,将炉内空气“赶走”,使气氛达到正常。这样箱式炉的最小用气量可根据下列经验式进行计算:

$$Q = 4.5V/t$$

- 式中  $Q$ ——炉子用气量(标准  $\text{m}^3/\text{h}$ );  
 $V$ ——炉膛容积( $\text{m}^3$ );  
 $t$ ——冷工件升温到  $650^\circ\text{C}$  的时间(h)。

5) 井式炉 井式炉也是周期性操作的炉子。通常炉盖设置在炉子上方,即顶开式。当炉盖打开的短时间(一般在 10 s 左右,取决于用气量)内,炉内气体即冒散光。随即大量的空气灌进炉内。当待处理的工件装入炉内,合上炉盖时,炉内充满了空气。与此同时,冷工件使炉膛温度迅速下降。工件温度尚未升到  $650^\circ\text{C}$  时,炉内正在调整的不正常气氛( $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  高)不会使工件脱碳。为此,井式炉的用气量需要满足工件升温到  $650^\circ\text{C}$  之前使气氛达到正常。这个用气量可以按下式计算:

$$Q = 4.5S \cdot H/t$$

式中  $Q$ ——炉子用气量(标准  $m^3/h$ )；  
 $S$ ——井式炉炉膛的横断面积( $m^2$ )；  
 $H$ ——井式炉炉膛深度(m)；  
 $t$ ——冷工件升温到  $650^\circ C$  的时间(h)。

## 二、气氛的主要组成

组成气氛的主要气体见表 5-2。其对常用金属的化学作用见表 5-3。

表 5-2 组成气氛的主要气体

气 体	简 要 说 明
空 气	炉膛内出现空气的情况有：未使用控制气氛时，开炉时未通入气体时，停炉及发生故障而停送气体时，以及从炉膛缝隙、开启炉门泄漏进炉内的空气。它是炉气的组成。空气的组成： $\approx 79\%$ 氮气， $\approx 21\%$ 氧气，少量(变化)的水汽，氩气和微量的二氧化碳，氢气等。氧气、水汽和二氧化碳使空气对金属、钢铁等显示出氧化性
氧 气	氧气是空气的重要组分。在加热过程中对大多数金属、钢铁显示氧化和脱碳性。除了少数特殊场合外，一般气氛中氧气是不受欢迎的气体，其含量越低越好。一般不应超过 $1\%$
氮 气	氮气也是空气的重要组分。分子状态的氮气在通常的加热过程中对一般的金属和钢铁显示中性，即既不氧化、脱碳，也不使氧化物还原。原子状态的氮能渗入钢铁的表层，与铁形成铁的氮化物
氢 气	氢气能使金属的氧化物还原，显示出强的还原性。含有水汽(即使十分微量)的氢气在 $700^\circ C$ 以上能使钢铁，特别是高碳钢脱碳，而下燥的氢气则不会脱碳。它可以单独形成氢气氛，更多的是与其他气体组成多组分的气氛。在工业上多采用电解水来获得氢气。氢气十分活泼，能渗入钢铁内部，淬火后常常使高强度钢产生氢脆缺陷。氢气是易燃易爆气体，使用时要特别注意安全
水 汽	水汽对许多金属显示氧化性，对钢铁除显示氧化性外，还显示出脱碳性。水汽被用来对手工工具进行表面处理，过程中控制水汽的含量，就可使零件表面产生蓝色的防锈保护层
一氧化碳	一氧化碳对许多氧化物显示出还原性，能使铁的氧化物还原。对于钢铁它又是渗碳性的气体，在渗碳过程中是碳的输送者。对于如钛、铬、铝等与氧亲和力强的金属它又是氧化性的气体。含铬、钛的合金钢在含一氧化碳高的气氛中加热，常会发生内氧化缺陷。一氧化碳具有强的毒性，也是易燃易爆气体，使用时要注意安全
二氧化碳	二氧化碳是氧化和脱碳性气体，能使多种金属氧化，并能使钢铁产生脱碳
甲 烷	甲烷气体是还原和渗碳性气体。在渗碳过程中，甲烷是碳的供应者，通过与气氛中的二氧化碳和水汽的反应，增加气氛中的一氧化碳，使得气氛得以保持高的碳势，保证渗碳过程持续进行下去
氩 气	氩气是一种惰性气体，空气中仅含有 $0.93\%$ ，价格昂贵，主要用于易氧化的金属及其合金的热处理保护气氛
氦 气	氦气也是一种惰性气体，它比氩气更稀少，价格更贵，一般在航天航空及原子能工业等高科技领域中应用

注：本章所有气体成分均指体积分数。

表 5-3 组成气氛的几种气体对常用金属的化学作用

金 属	气氛组成气体						
	氧 气	二 氧 化 碳	一 氧 化 碳	氢 气	甲 烷	水 汽	氮 气
铁	氧化	氧化	渗碳	—	渗碳	氧化	—
钢	氧化、脱碳	氧化、脱碳	渗碳	脱碳 <sup>①</sup>	渗碳	氧化、脱碳	—
铝	氧化	氧化	—	—	—	—	—
铜	氧化	氧化	—	—	—	—	—
氧化铁	—	—	还原	还原	还原	还原	还原

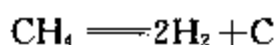
注：① 含有水汽，即使十分微量。

### 三、炉内气氛的气体反应

炉内气氛的气体反应可发生在气相内,各种气体之间相互反应可以称为气相反应;还可发生在金属(钢铁)表面上,气体与金属(钢铁)的反应称为气-固界面反应。

#### 1. 气相反应

1) 甲烷 气相中甲烷在高温下发生裂解:

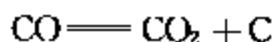


裂解生成的原子状态的碳在气相中只能短暂存在。碳原子在气相中不断运动、相互靠拢结合成原子团(6个以上原子),即成为炭黑。这个反应是吸热的,升高温度有利于反应向右方进行。

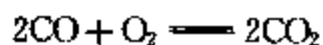


以上反应使甲烷成为渗碳气氛中碳的供应者,即碳源。

#### 2) 一氧化碳

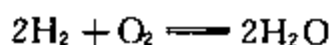


反应生成的碳原子也会聚集成炭黑。反应是放热的,降温有利于反应的进行,在400~700℃的温度范围内得到发展。



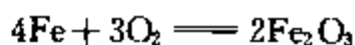
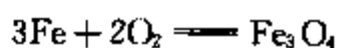
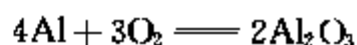
CO与H<sub>2</sub>O的反应普遍存在于含一氧化碳、氢气、水汽和二氧化碳的气氛中,使气氛很快达到平衡。

#### 3) 氢气

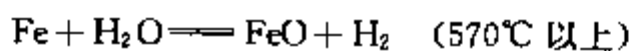


#### 2. 气-固界面反应

1) 氧气 氧气能与所有金属发生氧化反应。氧气与常用的金属及其合金元素、钢铁的氧化反应:



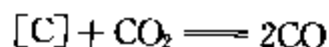
2) 水汽 水汽也能与所有金属发生氧化反应:



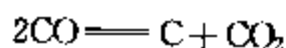
3) 二氧化碳 二氧化碳与金属也能发生氧化反应:



\* [C]表示固溶在钢铁中的碳,下同。

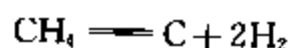


4) 一氧化碳 一氧化碳在钢铁的表面由于铁的催化作用裂解出碳原子:



裂解出来的碳原子随即被钢的表面吸收,溶解于奥氏体中,向钢的心部扩散,这是钢的渗碳反应。一氧化碳乃是渗碳气体。

5) 甲烷 甲烷在钢的表面也会发生裂解反应:



碳原子被钢表面吸收,溶解于奥氏体中,进而向钢的心部扩散,因此甲烷也是渗碳性气体。

## 四、气氛的碳势

### 1. 碳势的概念

碳势是含碳气氛的一种重要特征,它表征气氛在钢的某一奥氏化温度与其奥氏体中的碳含量相平衡的能力。当气氛的碳势高于奥氏体中的碳含量时,气氛中的碳即流向钢的表面,则钢的表面被渗碳;反之,即气氛的碳势低于奥氏体中的碳含量时,奥氏体中的碳逸出钢的表面流入气氛中,则钢的表面脱碳;当气氛的碳势与奥氏体中碳含量相当时,没有碳的流动,则钢的表面既不渗碳,也不脱碳。

### 2. 碳势的测量

测量气氛碳势的方法有许多种,大致可分为直接式和间接式两种,常用的有直接式——钢箔法和电阻法,间接式——露点法、红外线二氧化碳法和氧探头法等。它们各有其优点和缺点。表5-4列出了这些方法的简要情况。

表5-4 测量碳势的方法及其比较

方式	测量法	测量原理要点	应用仪器	主要优缺点	备注
直 接 式	钢箔法 <sup>①</sup>	直接测量放置炉内气氛中处理的薄的纯铁片碳的质量分数的变化	定碳仪、微量天平	简单、直观、准确、可靠。测量时间长,不能连续测量	是目前生产上校对气氛碳势的唯一方法
	电阻法	由于金属(镍)丝中碳的质量分数与其电阻有着对应的关系。直接测量放置炉内气氛中的金属(镍)丝电阻即可测出气氛的碳势	金属(镍)丝电阻探头和自动平衡电桥	可连续测量、记录和控制碳势。探头直接在炉内接近工件的地方,不需要取样管,气氛情况真实。输出电信号,探头价格便宜。受炭黑干扰严重,影响测量结果	目前生产上应用不多
间 接 式	露点法	在CO-H <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> 系统中CO和H <sub>2</sub> 含量不变的气氛,碳势与H <sub>2</sub> O含量有着对应的关系,也就是与露点有着对应的关系。露点间接反映了气氛的碳势	氯化锂露点仪、镜面露点仪、电容露点仪等	可连续测量,记录和控制碳势。气样管路长,路径低于露点温度区,要析出水分,影响气样成分。仪器响应时间长	是早期碳势控制的主要方法,现在应用少
	红外线二氧化碳法	在CO-H <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> 系统中CO和H <sub>2</sub> 含量不变的气氛,碳势与CO <sub>2</sub> 也有着对应的关系。CO <sub>2</sub> 含量间接反映了气氛的碳势	红外线二氧化碳分析仪	可连续测量、记录和控制碳势。响应时间比露点仪短。取样管路经过400~700℃温度区析出炭黑,增高气样的二氧化碳浓度,造成误测量	目前生产中仍有应用,但不多,有淡出趋势
	氧探头法	根据有关物理化学的计算式,含碳气氛的碳势与氧探头输出的毫伏值有着对应的关系。测出毫伏值即可间接测出气氛的碳势	氧化锆氧探头,有些场合要辅以红外线一氧化碳分析仪	氧探头直接插在炉内接近工件的地方,输出电信号,能真实、快速反映工件周围气氛的碳势。易受炭黑的干扰。探头不能耐急冷急热	目前在生产上普遍应用

注:① 参阅标准 JB/T10312-2001。

3. 碳势的应用

1) 碳势与露点和二氧化碳的关系 图 5-1、图 5-2、图 3-18 为吸热式气氛碳势与露点和二氧化碳的关系。

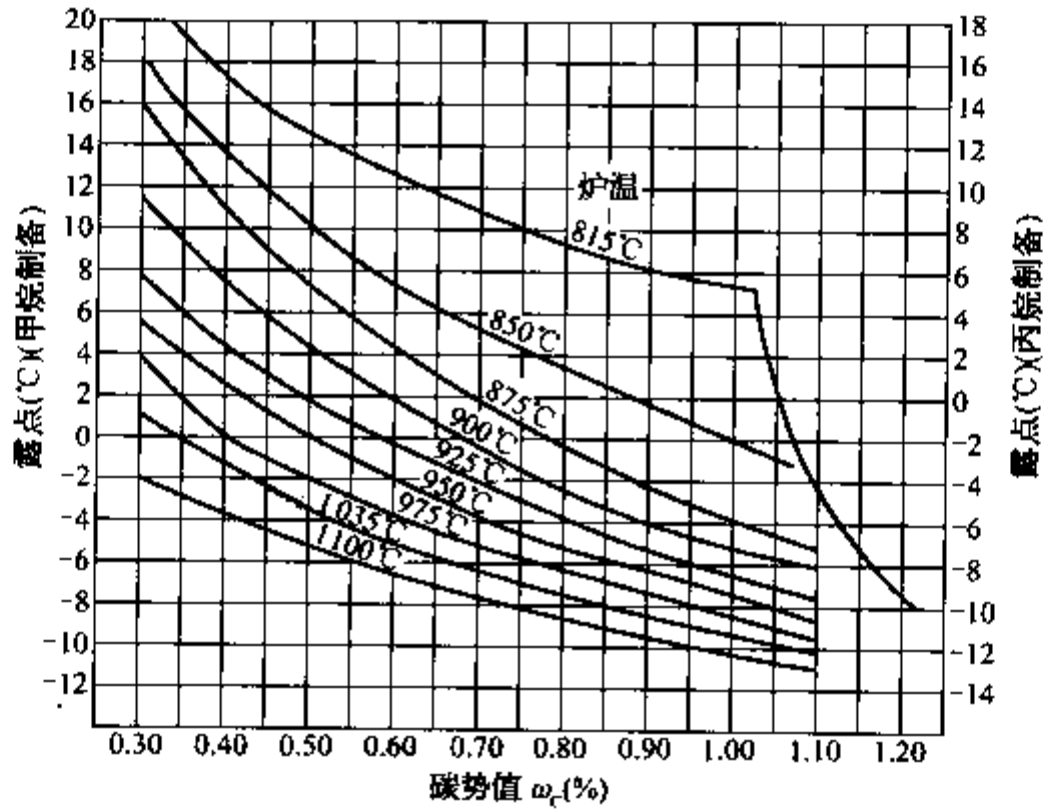


图 5-1 甲烷和丙烷制备的吸热式气氛碳势与露点之间的关系图

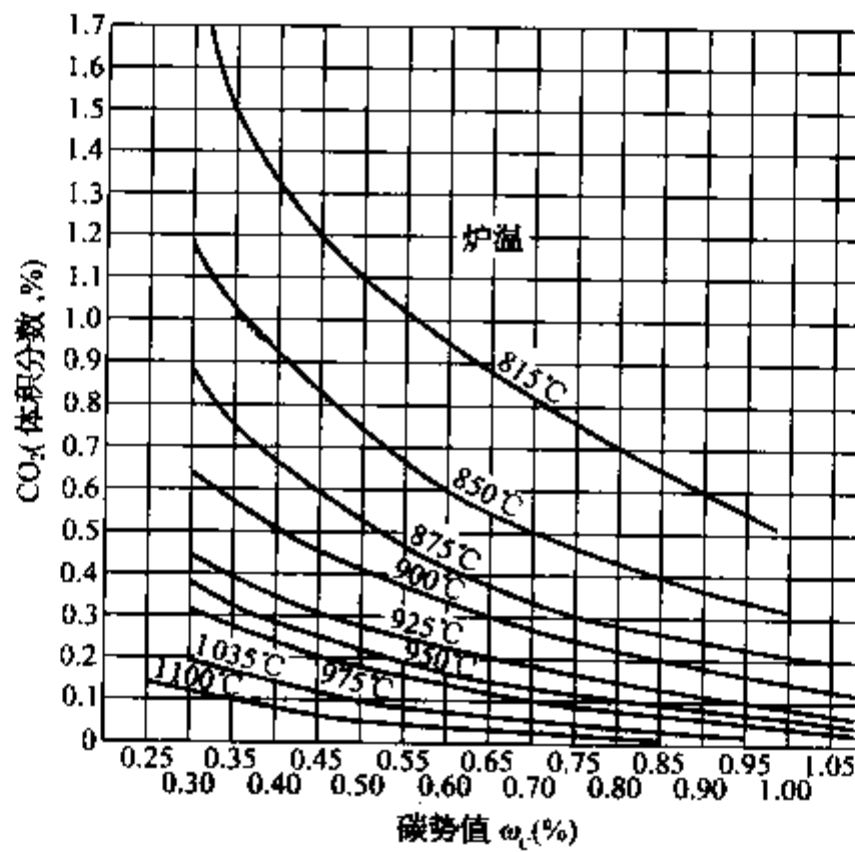


图 5-2 丙烷制备的吸热式气氛碳势与二氧化碳的关系图

2) 碳势与氧探头输出毫伏的关系 表 5-5、表 5-6 和表 5-7 分别为  $\phi_{CO} = 20\%$ 、 $23\%$ 、 $30\%$  时在不同的温度下,碳势值  $\omega_c$  与氧探头输出毫伏(mV)数的关系。



表 5-5  $\phi_{CO}=20\%$ 时在不同温度下的碳势值与氧探头输出值

碳势值 $\omega_c$	氧 探 头 输 出 值 (mV)									
	800℃	820℃	840℃	860℃	880℃	900℃	920℃	940℃	960℃	980℃
0.20	1 029	1 033	1 038	1 043	1 047	1 052	1 056	1 061	1 065	1 070
0.40	1 063	1 069	1 073	1 079	1 084	1 089	1 094	1 099	1 104	1 110
0.60	1 084	1 090	1 095	1 100	1 106	1 112	1 117	1 123	1 128	1 134
0.70	1 092	1 098	1 103	1 109	1 115	1 121	1 126	1 132	1 138	1 143
0.80	1 099	1 105	1 111	1 117	1 123	1 128	1 134	1 140	1 146	1 152
0.85	1 103	1 109	1 114	1 120	1 126	1 132	1 138	1 144	1 150	1 160
0.90	1 106	1 112	1 118	1 124	1 130	1 136	1 142	1 148	1 153	1 159
0.95	1 109	1 115	1 121	1 127	1 133	1 139	1 145	1 151	1 157	1 163
1.00	1 112	1 118	1 124	1 130	1 136	1 142	1 148	1 154	1 160	1 166
1.05	1 115	1 121	1 127	1 133	1 139	1 145	1 151	1 157	1 164	1 170
1.10	1 117	1 124	1 130	1 136	1 142	1 148	1 154	1 161	1 167	1 173

表 5-6  $\phi_{CO}=23\%$ 时在不同温度下的碳势值与氧探头输出值

碳势值 $\omega_c$	氧 探 头 输 出 值 (mV)									
	800℃	820℃	840℃	860℃	880℃	900℃	920℃	940℃	960℃	980℃
0.20	1 023	1 027	1 031	1 036	1 040	1 045	1 049	1 054	1 058	1 062
0.35	1 050	1 055	1 060	1 065	1 070	1 075	1 080	1 084	1 089	1 094
0.40	1 057	1 062	1 067	1 072	1 077	1 082	1 087	1 092	1 097	1 102
0.60	1 077	1 083	1 088	1 094	1 099	1 105	1 110	1 115	1 121	1 126
0.70	1 086	1 091	1 097	1 102	1 108	1 113	1 119	1 126	1 130	1 136
0.80	1 093	1 099	1 104	1 110	1 116	1 121	1 127	1 133	1 139	1 144
0.85	1 096	1 102	1 108	1 113	1 119	1 125	1 131	1 137	1 142	1 148
0.90	1 099	1 105	1 111	1 117	1 123	1 129	1 134	1 140	1 146	1 152
0.95	1 102	1 108	1 114	1 120	1 126	1 132	1 138	1 144	1 150	1 155
1.00	1 105	1 111	1 117	1 123	1 129	1 135	1 141	1 147	1 153	1 159
1.05	1 108	1 114	1 120	1 126	1 132	1 138	1 144	1 150	1 156	1 162
1.10	1 111	1 117	1 123	1 129	1 135	1 141	1 147	1 153	1 159	1 165

表 5-7  $\phi_{CO}=30\%$ 时在不同温度下的碳势值与氧探头输出值

碳势值 $\omega_c$	氧 探 头 输 出 值 (mV)									
	800℃	820℃	840℃	860℃	880℃	900℃	920℃	940℃	960℃	980℃
0.20	1 010	1 015	1 019	1 023	1 027	1 031	1 035	1 040	1 044	1 048
0.40	1 044	1 049	1 054	1 059	1 064	1 068	1 073	1 078	1 083	1 088
0.60	1 065	1 071	1 075	1 081	1 086	1 091	1 096	1 102	1 107	1 112

(续表)

碳势值 wC	氧探头输出值(mV)									
	800℃	820℃	840℃	860℃	880℃	900℃	920℃	940℃	960℃	980℃
0.70	1 073	1 079	1 084	1 089	1 095	1 100	1 105	1 111	1 116	1 121
0.80	1 080	1 086	1 091	1 096	1 102	1 108	1 113	1 119	1 124	1 130
0.85	1 084	1 090	1 095	1 100	1 106	1 112	1 117	1 123	1 128	1 134
0.90	1 087	1 093	1 098	1 104	1 109	1 115	1 121	1 126	1 132	1 138
0.95	1 090	1 096	1 101	1 107	1 113	1 118	1 124	1 130	1 135	1 141
1.00	1 093	1 099	1 104	1 110	1 116	1 122	1 127	1 133	1 139	1 145
1.05	1 096	1 102	1 107	1 113	1 119	1 125	1 130	1 136	1 142	1 148
1.10	1 099	1 105	1 110	1 116	1 122	1 128	1 134	1 139	1 146	1 151

## 第二节 常用热处理气氛及其获得

### 一、常用热处理气氛

常用热处理气氛有吸热式气氛、放热式气氛、甲醇裂解气氛、氮气+甲醇裂解气氛、丙酮+空气、氨裂解气氛、氨燃烧气氛和氢气气氛等。表5-8列出了这些气氛的典型成分和应用范围。

表5-8 常用热处理气氛的典型成分和应用范围

气氛		典型成分(%)						应用范围
		CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	露点(℃)	
放热式	浓型	10.2~11.1	5~7.3	6.7~12.5	0.5	余量	决定于 脱水方式	低中碳钢少无 氧化加热保护
	淡型	~1.5	10.5~12.8	0.8~1.2	0			
净化放热式		12~15	0.01~1	8~12	~1.5	余量	~-40	中高碳钢少无 氧化加热保护、 渗碳、碳氮共渗、 氮碳共渗载体气
吸热式		19~25	0.1~1	30.5~40.5	0.1~1	38.5~45	-15~10	
甲醇 裂解	发生器	~33	微量	~66	微量	极少	-15~10	
	滴注							
氮气+甲醇		15~25	0.1~1	15~45	微量	余量	-15~10	
丙酮+空气		28~33	未测	未测	未测	未测	未测	渗碳气氛
氨气裂解		0	0	75	0	25	-25~-40	低碳钢、不锈 钢无氧化保护 加热
氨气燃烧		0	0	~10	0	~90	~60	
氢气		0	0	~100	0	0	~40	不锈钢、特殊 合金无氧化保护 加热

控制气氛的分类方法有多种,表5-9列出了气氛分类代号的汇总和对照。

表 5-9 控制气氛分类代号汇总及对照表

气氛名称	中国机标分类代号	美国煤气协会分类代号	日本中外炉株式会社分类代号
普通放热式气氛	PFQ	100	DX
净化放热式气氛	JFQ	200	DX
吸热式气氛	XQ	300	RX
甲醇裂解气氛	YLQ	--	--
氮气+甲醇裂解气氛	DQ	--	--
丙酮+空气裂解气氛	--	--	--
氨气裂解气氛	FAQ	601	AX
氨气燃烧气氛	RAQ	621,622	SAX
氢气	QQ	--	--

## 二、制备气氛的主要原料

### 1. 天然气

天然气是可燃性气体,是优良的气体燃料和化工原料。其主要成分是甲烷,占80%~97%,其他还有少量氢气、乙烷、丙烷、氮气、二氧化碳、水汽和硫化氢等。从成分上看,天然气分为两种类型:干性和湿性,干性气中甲烷含量高。天然气可以独立储存于地下,也可以与石油伴生。

### 2. 液化石油气

用作气源的液化石油气有丙烷、丁烷,以及它们的混合物——丙—丁烷,它们是炼油厂或石油化工厂的产品或副产品。产品气中除了烷烃外,还有烯烃,如丙烯和丁烯等。此外,还有硫化氢等硫的化合物。由于烯烃在高温下易析出炭黑,而硫的化合物会使镍质催化剂产生永久性中毒,以及对钢铁等金属产生腐蚀作用,因此用作控制气氛原料气的液化石油气应将烯烃和硫化物限制到最少。

市场上的液化石油气以瓶装、罐装或槽装的液态供应给用户,运输、储存和使用都涉及安全问题。常用的液化石油气的一些物理性能数值见表5-10。

表 5-10 常用液化石油气的几种物理性能数值

名称	气体组分				
	丙烷	丙烯	丁烷	丁烯	
分子式	$C_3H_8$	$C_3H_6$	$C_4H_{10}$	$C_4H_8$	
分子量	44	42	58	56	
液态密度(15℃)( $kg/m^3$ )	0.508	0.522	0.584	0.601	
气态相对密度(空气密度为1)	1.522	1.453	2.071	1.937	
气体产生量	$m^3/L$	0.273	0.284	0.238	0.253
	$m^3/kg$	0.542	0.537	0.407	0.420
发热值(低)	kcal/kg	11 010	10 877	10 857	10 758
	kcal/ $m^3$	21 110	19 420	27 600	25 630
蒸发潜热(kcal/kg)	101.9	104.6	92.17	96.70	

### 3. 液态碳氢化合物

常用的液态碳氢化合物有甲醇、乙醇、丙酮、甲苯、二甲苯和煤油等,其中前三种为含氧的碳氢化合物,后三种为无氧的碳氢化合物;前五种是单一的化合物,而煤油则是多种  $C_9H_{20} \sim C_{15}H_{34}$  的直链烃的混合物。不同批号的煤油,这些烃链的比例都不相同。表 5-11 列出了这些碳氢化合物的性能数据。

表 5-11 常用的几种碳氢化合物的性能数据

项 目	甲 醇	乙 醇	丙 酮	甲 苯	二甲苯	煤 油
分子式	$CH_3OH$	$C_2H_5OH$	$CH_3COCH_3$	$C_6H_5CH_3$	$C_6H_4(CH_3)_2$	$C_nH_{2n+2}^{\text{①}}$
分子量	32	46	58	92	106	— <sup>②</sup>
相对密度 <sup>③</sup>	0.791	0.789	0.791	0.867	0.861~0.880	— <sup>③</sup>
沸点(°C)	64.7	78.3	56	110.6	138~144	110~325
闪点(°C)	≈0	12	≈20	5	≈20	28
自燃点(°C)	475	404	500	553	500	435
发热值(kcal/mol)	170.9	327.6	426.8	934.2	1091.7	10300~11000 <sup>④</sup>

注: ①  $n=9\sim16$ ;

② 煤油是混合物,分子量随混合比而定;

③ 随直链烃混合比而定;

④ 单位为 kcal/kg;

⑤ 在 4°C, 0.101325 MPa(760 mmHg)时,水的密度为 1。

### 4. 氨气

氨气是由人工合成的。它是许多化学工业的原料,特别是化肥工业。氨气是一种无色气体,有强烈的刺激气味,有毒,在常温加压即可被液化成无色的液体。氨气很容易溶解于水,成为氨水。氨水是混合物,不是液氨。液氨是单一物质。表 5-12 列出了氨气的一些物理化学性质。氨气以瓶装或槽装的液态运送到用户使用点,再将其气化使用。

表 5-12 氨气的一些物理化学性质

分子式	分子量	密 度			标准状态 沸点(°C)	蒸发潜热 (kcal/kg)	发热值 (kcal/m <sup>3</sup> )
		气态密度 (标准状态) (kg/m <sup>3</sup> )	气态相对 密度(空气 密度为 1)	液态密度 (kg/L)			
NH <sub>3</sub>	17	0.771	0.590	0.610	-33.4	328	3980
液体气化量		蒸气压力(MPa)		室温下爆炸范围(%)		最低着火温度 (°C)	
(m <sup>3</sup> /L)	(m <sup>3</sup> /kg)	21°C	38°C	下限	上限		
0.860	1.411	0.798	1.380	16.00	27.00	780	

### 5. 氮气

氮气大量存在于空气中,约占空气的 79%。在工业上获取氮气可以用化学的和物理的方法分离空气中的氧气和氮气,有燃烧氮气法、燃烧碳氢化合物法、深冷空分法、变压吸附法和膜分离法等。

1) 深冷空分法 将空气高压压缩,绝热膨胀(吸热),使空气快速降温至 -193°C 以下,成为液态空气,再利用氮气和氧气的沸点不同进行分馏,使氧气与氮气分离。这个工艺过程的主产品是氮气和氧气,副产品是氩气、氦气和氖气等稀有气体。

气体制造商向市场供应的有气态的氮和液态的氮。气态的氮用能承受 15 MPa 的高压气瓶装运。这种气

瓶容量较小(5 m<sup>3</sup>左右)。氮气纯度有普氮(99.000%)、纯氮(99.900%)、高纯氮(99.990%)和超高纯氮(99.999%)等几个等级。高压气瓶的制造、运输和储存都必须遵守国家相关的安全法规。

液态氮纯度较高,相当于高纯氮(99.990%)以上。供应商用保温的槽车将液氮运送到用户现场,储存于安装在现场的保温储槽中。带有真空保温层的储槽使其保持在低温状态。图5-4为液氮储槽结构示意图。储槽中液氮上方的空间是具有一定压力的气态氮。在这个压力作用下,液氮被压出储槽,进入蒸发器中。在这里液态氮与大气进行热交换,升温、蒸发,转化为气态氮,经管道输送到热处理炉的气体控制屏。输出的氮气压强可以调节。

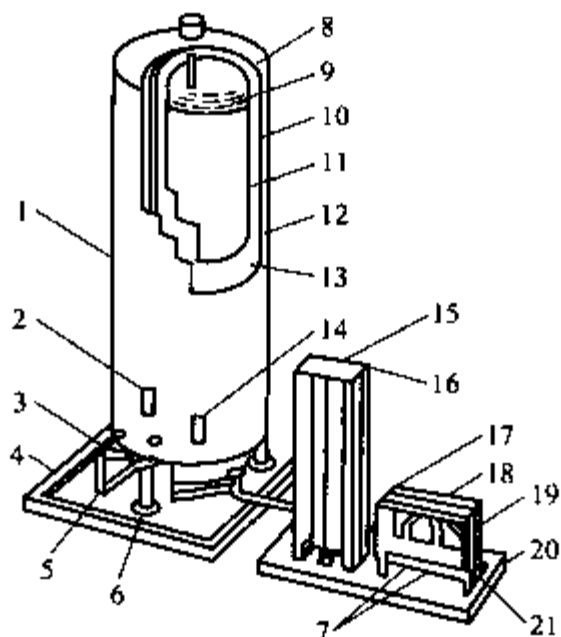


图 5-3 液氮储槽结构示意图

- 1—液氮罐; 2—电气控制板; 3—顶注阀; 4—水泥底板; 5—拖运罐连接; 6—底注阀; 7—调压截止阀; 8—吊环; 9—汽化空间; 10—镍铬合金制内罐; 11—液氮; 12—碳钢制外罐; 13—真空绝热层; 14—液位和压强仪表屏; 15—空气蒸发器; 16—电气选择开关; 17—低压截止阀; 18—室内管道压强计; 19—调压台; 20—气态氮输出; 21—调压阀

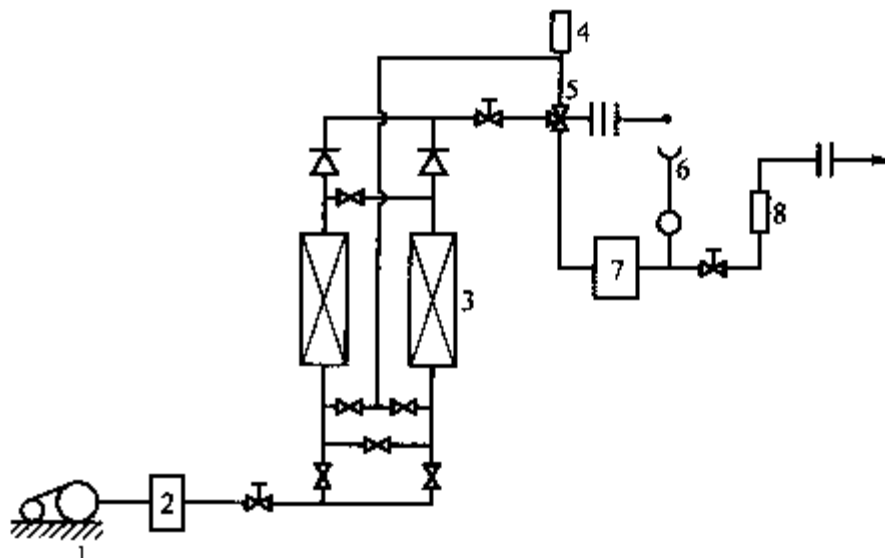


图 5-4 碳分子筛变压吸附(常压解吸)装置流程图

- 1—无油空气压缩机; 2—空气缓冲罐; 3—吸附塔; 4—消声器; 5—三通切换阀; 6—氧分析仪; 7—产品氮气缓冲罐; 8—流量计; 9—输出产品氮气

2) 变压吸附分离空气法 变压吸附分离的原理是利用具有多孔的分子筛吸附剂对不同的气体分子具有不同的吸附能力,进而达到分离的目的。分子筛表面吸附某种气体分子多了,即趋于饱和,其吸附能力下降。吸附是物理过程,是可逆的。加压有利于吸附,减压将使被吸附的气体分子离开吸附剂表面——解吸。解吸后分子筛又恢复吸附能力。目前应用得多的吸附剂是碳分子筛。这种吸附剂优先吸附氧气分子。经过除油过滤,空气被压缩达到一定压强(如 0.608 MPa),流过碳分子筛后氧气即被吸附,气流中的氮气即被富化。解吸排出的是富氧气体。减压可有两种方式:抽真空,称为真空解吸;另一种是常压解吸,即将吸附塔直接排空,降到大气压强。现在常压解吸已被广泛应用。图5-4是碳分子筛变压吸附(常压解吸)装置流程。

3) 膜分离法 膜分离空气制取氮气的原理和过程都较为简单,它是利用不同的气体溶解于某些高分子化合物材料的程度不同和扩散速度不同,将空气中的氧气和氮气分离。人们将溶解度大、扩散速度快的气体称为“快气”;反之则称为“慢气”。气体对不同的材料扩散速度是不同的。如有某类材料其气体扩散的快慢顺序是(从快到慢):水汽、氢气、氦气、二氧化碳、氧气、氩气、一氧化碳、甲烷和氮气。很明显,如果利用这种材料就很容易将氧气和氮气分离。现在通行的方法是将这种高分子材料制成比头发还细的中空纤维,再将数十万根这样的纤维组合起来,成为一个像列管式热交换器那样的膜分离筒。中空纤维管壁就是起分离作用的薄膜。几个分离筒用串联或并联的方法连接起来构成一台膜分离装置。

深冷空分、变压吸附分离和膜分离三种方法技术经济比较的情况见表5-13。

表 5-13 深冷空分、变压吸附分离和膜分离三种方法的技术经济比

项 目		深 冷 空 分	变 压 吸 附 分 离	膜 分 离
原 理	分离机理	低温精馏	加压吸附—减压解吸	溶解—扩散
	有无相变	有	无	无
技 术 简 况	产品气纯度	99.5%~99.999%	98%~99.5%,更高纯度需净化流程	95%~99%,更高纯度需净化流程
	工艺流程	复杂	一般	简单
	生产规模	宜大不宜小,2 000 m <sup>3</sup> /h 以上 <sup>①</sup>	宜小不宜大,2 000 m <sup>3</sup> /h 以下	宜小不宜大,400 m <sup>3</sup> /h 以下
	对原料气的要求	脱水,脱油	脱水,脱油	脱油
设 备 简 况	设备可移动性	大型设备都是固定式,50 m <sup>3</sup> /h以下设备可为移动式	可为固定式,也可为移动式	移动式
	有无运动部件	有	有,阀门开启频繁	无
	占地面积	大	中	小
	启动时间	大于6 h	小于30 min	小于1 min
	可否随时开/停车	不可以	不宜	可以
	长期运转稳定性	不好	不好	很好
	实现无人操作	难	较难	容易
	维修情况	维修量大	维修频率高	很少维修
经济性	能耗(200 Nm <sup>3</sup> /h)	0.6 kW·h/Nm <sup>3</sup> <sup>②</sup>	0.55 kW·h/Nm <sup>3</sup>	0.40 kW·h/Nm <sup>3</sup>

注:① 国内曾有厂家试产过40 Nm<sup>3</sup>/h的小型液氮机,未能取得市场认可。

② 小于2 000 Nm<sup>3</sup>/h产气量不能显示其节能优点。

## 6. 氢气

自然界游离态的氢气很少,大多以化合态存在,如水和碳氢化合物等。工业上多采用电解水来制取氢气,装在高压(15 MPa)气瓶中输送到用户,或者在使用现场安装电解水的装置来直接生成氢气。特殊情况下也可由气体制造商提供液态氢。氢气是易燃易爆品,且爆炸比范围很宽,运输、储存和使用都要十分注意安全。

## 三、常用气氛的制备

### 1. 吸热式气氛

吸热式气氛是应用很广的经典发生器式气氛。它是用碳氢化合物气体如甲烷或丙烷、丁烷等与空气按一定比例混合后,在高温(1 050~1 100℃)、催化剂(镍基)的作用下反应产生的。它们的化学反应式是:



为简化计算,反应式中氧气:氮气比取1:4;Q为反应产生的热量,具体数字可查有关手册。

三个反应的混合比、产气倍数、产气量和产品气体的组成等理论计算数据见表5-14。

表 5-14 以甲烷、丙烷和丁烷为原料气的吸热反应计算数据

原料气	混合比 (原料气/空气) (体积比)	产气倍数 (产品气/ 原料气)	1 kg 原料气 的产气量 (标准 m <sup>3</sup> )	吸热式产品气的组分(%)						
				CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O (露点℃)	CH <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>
甲烷(CH <sub>4</sub> )	1/2.5	5	7	20.0	40.0	40.0	≤0.5	-10~+5	≤0.5	~0
丙烷(C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	1/7.5	13	6.62	23.0	30.8	46.2	≤0.5	-10~+5	≤0.5	~0
丁烷(C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	1/10	17	6.57	23.5	29.4	47.1	≤0.5	-10~+5	≤0.5	~0

上述三个反应实际上是碳氢化合物的不完全燃烧过程。图 5-5 是碳氢化合物气体燃烧程度与产品气体成分的关系。在这个图上吸热式气氛的反应位于左面,完全燃烧率  $\alpha$  的范围为 20%~40%。反应是放热的,但所放出的热量不多,不足以维持反应的温度,需要再供应它热量,从而称为“吸热反应”。吸热式气氛发生器的装置及流程图见图 5-6。

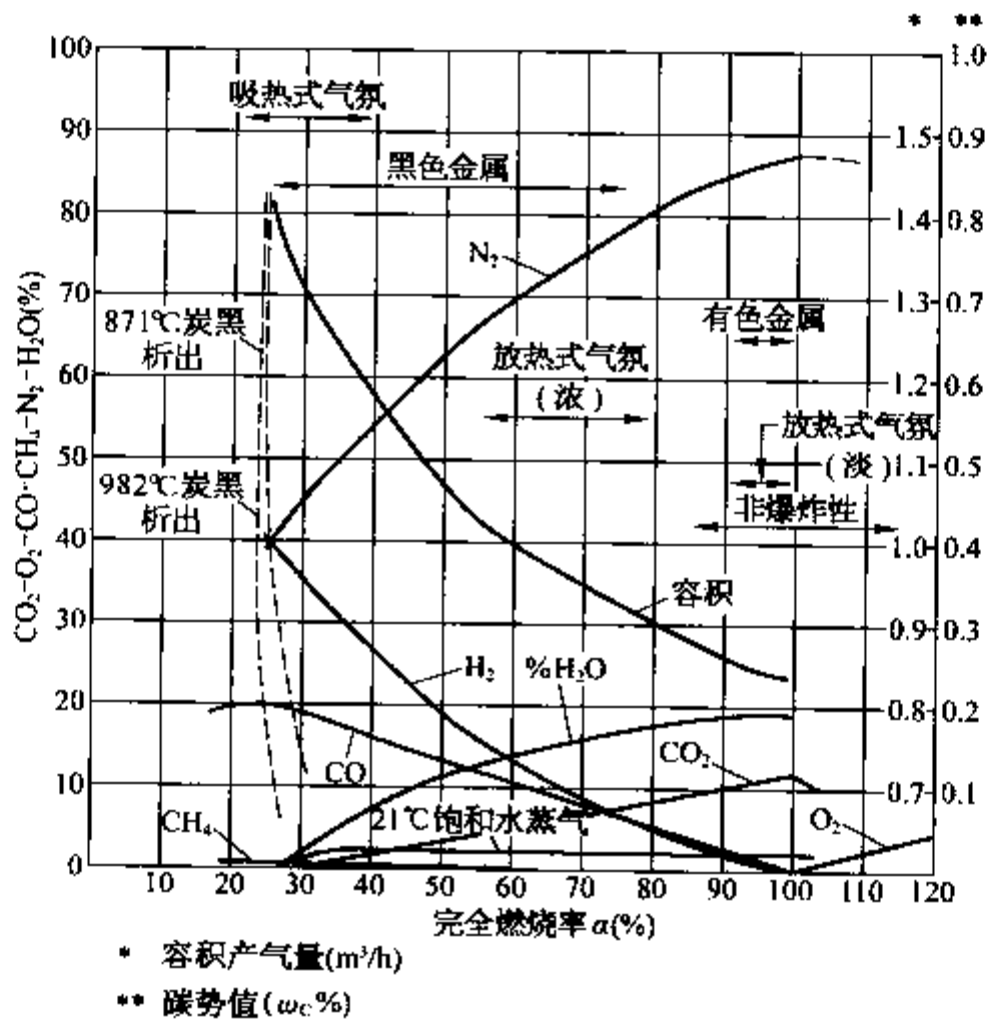


图 5-5 碳氢化合物气体燃烧程度与产品气体成分的关系

## 2. 放热式气氛

放热式气氛是用碳氢化合物气体(甲烷、丙烷、丁烷或城市煤气等)或液体(甲醇、乙醇、煤油、轻柴油等)与空气按一定的比例混合,进行不完全燃烧,其完全燃烧率  $\alpha$  大于吸热式气氛(见图 5-5,位于吸热式气氛区域右方)。因此,对于单位体积某一碳氢化合物所混合的空气量远大于吸热式气氛的量,气氛中的一氧化碳和氢气含量大大地减少,二氧化碳、水分和氮气含量都大大地增加,相应过程所放出的热量也大大地增大,并且使其足以维持反应过程,不需要再供应热量。

按照产品气的成分,放热式气氛分为浓型和淡型。浓型燃烧程度系数  $\alpha$  范围是 55%~80%;淡型则是 90%~98%。图 5-7 为放热式气氛制备流程图。图 5-8 为放热式气氛发生装置及系统流程图。

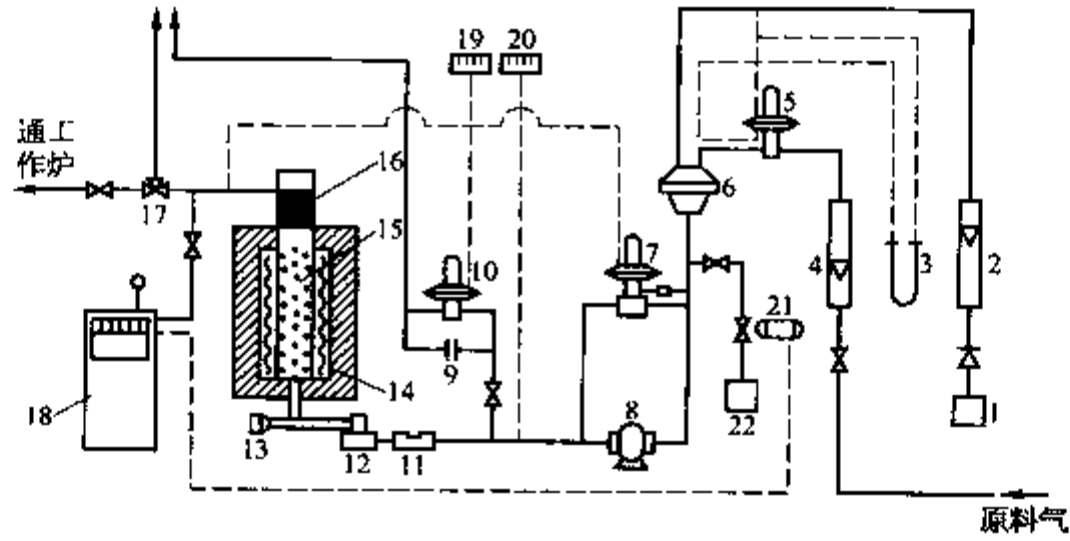


图 5-6 吸热式气氛发生器的装置及流程图

1—空气过滤器; 2—气体流量计; 3—压差计; 4—气体流量计; 5—零压阀; 6—气体混合器; 7—旁通阀; 8—鼓风机; 9—限流器(孔板); 10—放散阀; 11—单向阀; 12—消焰器; 13—防爆头; 14—发生器加热炉; 15—反应罐; 16—产品气冷却器; 17—三通阀; 18—气氛控制仪; 19—压强计; 20—压强计; 21—电动伺服阀; 22—空气过滤器

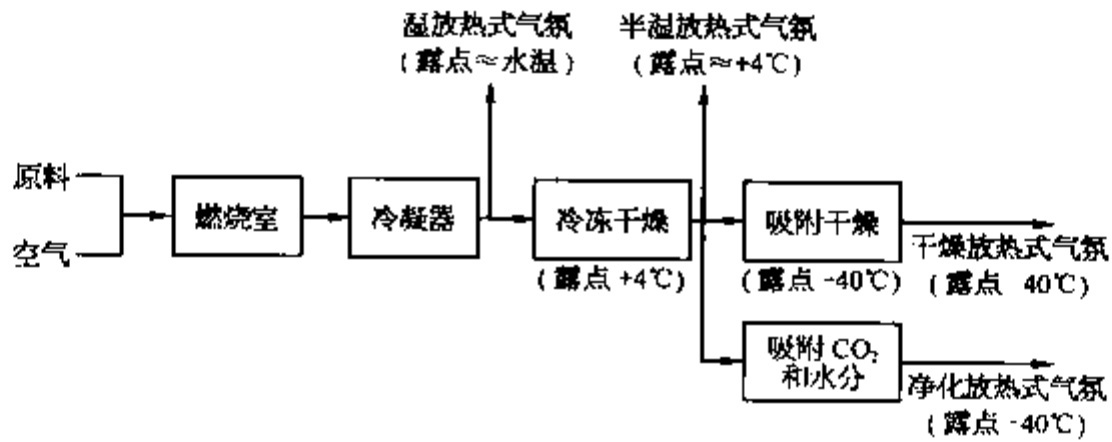


图 5-7 放热式气氛制备流程图

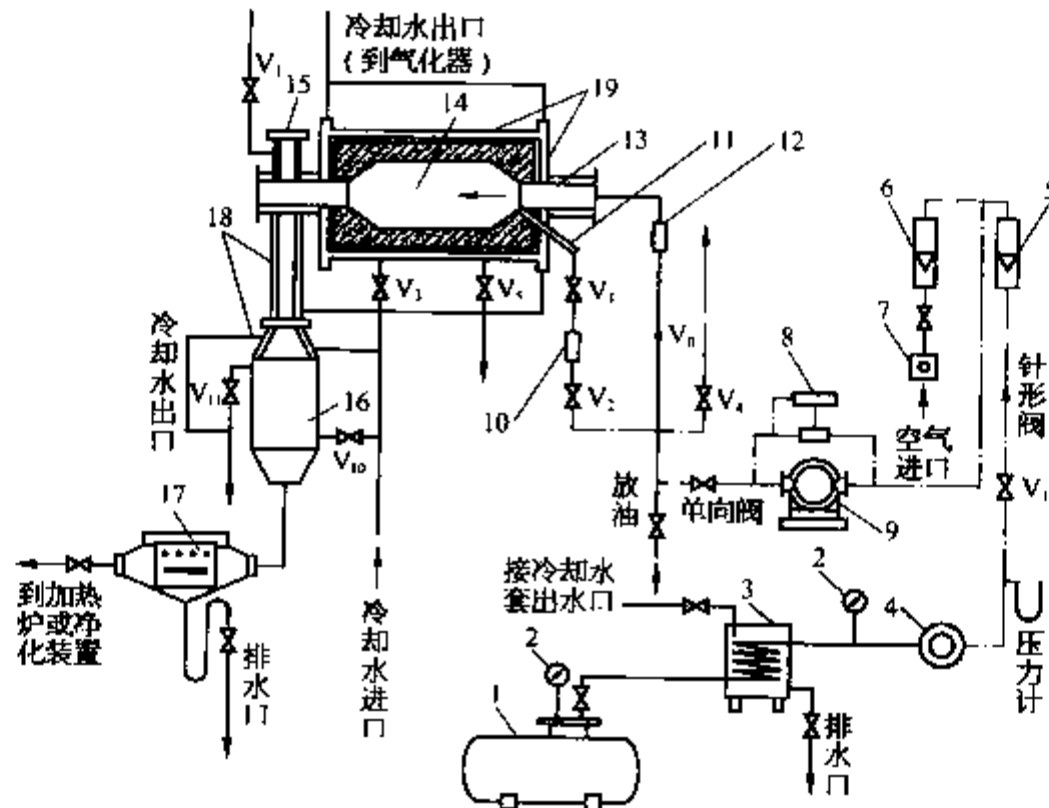


图 5-8 放热式气氛发生装置及系统流程图(以丙烷为原料气)

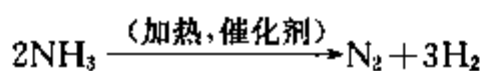
1—丙烷气储罐; 2—压强计; 3—汽化器; 4—减压阀; 5—丙烷流量计; 6—空气流量计; 7—空气过滤器; 8—旁通调节阀; 9—罗茨鼓风机; 10—缓冲器; 11—点火器; 12—灭火器; 13—烧嘴; 14—燃烧炉膛; 15—防爆器; 16—冷却器; 17—水气分离器; 18—冷却水套; 19—燃烧炉膛冷却水套



### 3. 氨裂解和氨燃烧气氛

氨裂解和氨燃烧气氛均以液氨为原料。液氨经降压和升温汽化成气态氨，供给裂解或燃烧装置。

氨的裂解反应是：



裂解反应的加热温度决定于所使用的催化剂。常用的有镍基和铁基催化剂。使用镍基催化剂时，加热温度为1000℃；铁基催化剂时则为700℃。不同的温度，氨气的裂解程度不同。表5-15列出了氨气裂解程度与温度的关系。

表 5-15 氨气裂解程度与温度的关系

温度(℃)	氨气裂解度(%)	残余氨气(%)	温度(℃)	氨气裂解度(%)	残余氨气(%)
300	95.620	2.240	700	99.950	0.025
350	98.080	0.970	750	99.965	0.017
400	99.070	0.464	800	99.974	0.013
450	99.510	0.244	850	99.979	0.0103
500	99.720	0.139	900	99.985	0.0073
550	99.830	0.083	950	99.988	0.0059
600	99.890	0.053	1000	99.990	0.00498
650	99.930	0.035			

图 5-9 为氨气裂解的流程图。

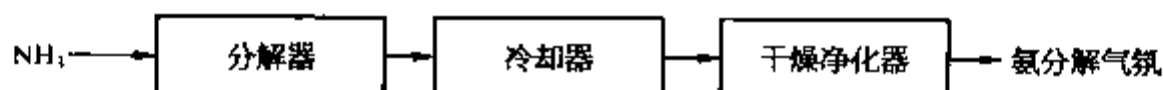
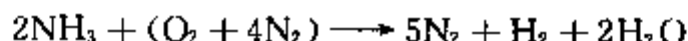


图 5-9 氨气裂解流程图

氨燃烧气氛的制备是将氨气按一定比例与空气混合，在一燃烧炉膛内进行不完全燃烧，燃烧产物中含有少量氨气。其反应是：



该反应是放热反应，所放出的热量足以维持其反应的温度，不需要再供应热量，也不需要催化剂。反应生成大量水分。因此要将产品气脱水，干燥。氨燃烧气氛的制备流程如图 5-10 所示。

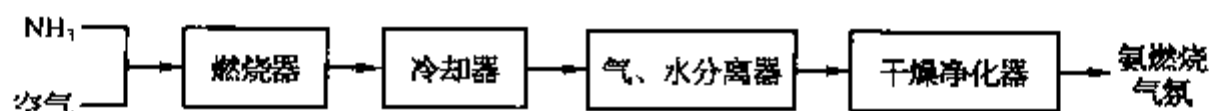


图 5-10 氨燃烧气氛的制备流程图

### 4. 甲醇裂解气氛

将甲醇加热至 65℃ 以上即成为甲醇蒸气，继续加热至高温即发生热裂解。甲醇热裂解是一个复杂的过程。根据有关物理化学相图所知，在 550℃ 以下过程按下式进行：



550~700℃ 之间的主要反应是：



反应中析出了炭黑。

700℃ 以上的主要反应是：

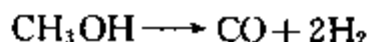


表 5-16 为甲醇在 700~900℃时的裂解产物。

表 5-16 甲醇在 700~900℃时的裂解产物

温度(℃)	裂解产物组分(%)					
	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C(g/标准 m <sup>3</sup> ) <sup>①</sup>	露点(℃)
700	4.53	22.04	60.52	4.85	30.80	43.45
800	1.21	30.34	64.06	1.93	7.37	21.29
850	0.57	31.92	64.90	1.27	2.74	11.46
900	0.28	32.69	65.45	0.85	0.66	2.79
950	0.14	32.99	65.84	0.57	0.80	-4.36

注: ① 通入炉子时气氛所沉积的碳。

#### 四、气氛的分析测量和仪器设备

气氛的分析和测量是对气氛控制的重要一步。常用的气氛分析测量方法见表 5-17。

表 5-17 常用的气氛分析测量方法及其特点

测量分析法	测量分析对象	应用的仪器	测量分析精度	反应速度	自动化能力	适用气氛主要类型
奥氏分析法	O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	奥萨特分析仪	重现性 0.2%	2~3 min/ 单个组分	手工间歇操作	各种气氛
气相色谱法	O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>	气相色谱仪	±1.0%	5 min	间歇式仪器操作	各种气氛
红外分析法	CO, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub>	红外线分析仪	±0.03%	15~30 s	连续式自动测量	吸热式、甲醇裂解、氮气-甲醇等气氛
露点法	H <sub>2</sub> O	露点杯	±2℃	≈5 min	手工间歇式操作	各种气氛
		冷镜面露点仪	±1℃	1 min	连续式自动测量	各种气氛
		雾室露点仪	±1.5℃	3~4 min	间歇式仪器操作	各种气氛
		氯化锂露点仪	±1℃	1~2 min	连续式自动测量	除含有氨气以外的各种气氛
		五氧化二磷露点仪	±1℃	1~2 min	连续式自动测量	各种气氛
		电容式露点仪	±0.5℃	20 s	连续式自动测量	各种气氛
氧势法	氧, 氧势, 碳势	氧化锆探头	±1 mV	2 s	连续式自动测量	含氧、含碳气氛

##### 1. 奥氏分析法和奥氏仪

奥氏分析法是根据吸收气体分析的原理工作的。在工作过程中, 气体混合物的组分有选择性地被某种特有的液体吸收, 给定的液体只吸收一种气体组分。测量吸收前后混合气体的体积, 就可以计算出被测组分的体积百分数。

这种方法用于炉气氛分析已有很长时间了, 可以算是一种经典的测量分析方法, 目前已逐渐为较为先进方法和仪器取代。

##### 2. 气相色谱法和气相色谱仪

气相色谱法是一种先进的气体分析方法, 应用于炉气分析已有多多年。其工作原理是被分析的气样在载体气(氢气、氮气或氦气等)的带动下流过由某种分子筛吸附剂组成的色谱柱, 由于分子筛对于不同的气体分子具有不同的吸附、溶解和解吸能力, 样气中的各组分被逐步分离, 并按先后顺序排列流出色谱柱, 流入检测器。在这儿显示出组分各自的“身份”, 形成具有峰值的色谱图形, 再用积分仪计算出各组分的结果。常用检测器有两

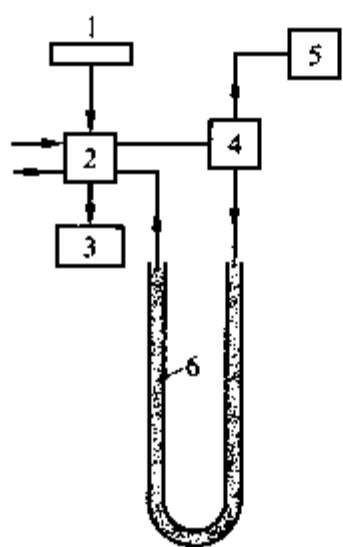


图 5-11 气相色谱仪测量系统示意图

- 1—直流电源；2—检测器；
- 3—记录器；4—样品进气管；
- 5—气样预处理单元；
- 6—色谱柱

种：一种是热导池：每一种气体都有其固有的热导率，能影响热敏电阻的变化，阻值变化与所测气体组分浓度变化成比例，通过电桥测出阻值的变化向外输出，并加以记录。另一种是氢火焰离子化检测器：被测气体在氢火焰电场作用下形成离子流，其强度大小与被测组分浓度成比例，通过微电流放大器将离子流大小放大输出，并记录。图 5-11 为气相色谱仪测量系统示意图。

气相色谱仪技术发展十分迅速，工业型仪器已实现了自动定时取样，可对多台气氛热处理炉或多个取样点进行巡回取样测量分析。

### 3. 红外线分析法和红外线仪

不同波长的红外线可以有选择地被化合物气体吸收，吸收的能量与这种气体的浓度成比例，测出红外线光波被吸收前后的能量差，即可得到所测气体的浓度。图 5-12 为红外线分析原理图。图中所示为传统的电容微音检测器式，现在新型的仪器，其检测器采用了碲化铋的半导体材料，可十分灵敏地检测出红外线能量的变化。使用新型检测器不仅使仪器体积小，而且可免去预热，以及由于检测室漏气带来的检测过程中的“零点漂移”等。红外线分析仪可以测量分析二氧化碳、一氧化碳、甲烷和氨气等化合物气体，不能测量分析如氮气、氧气、氢气等单质气体。测量分析氨气的红外分析仪其测量气室内壁需镀金，以防氨气的腐蚀。

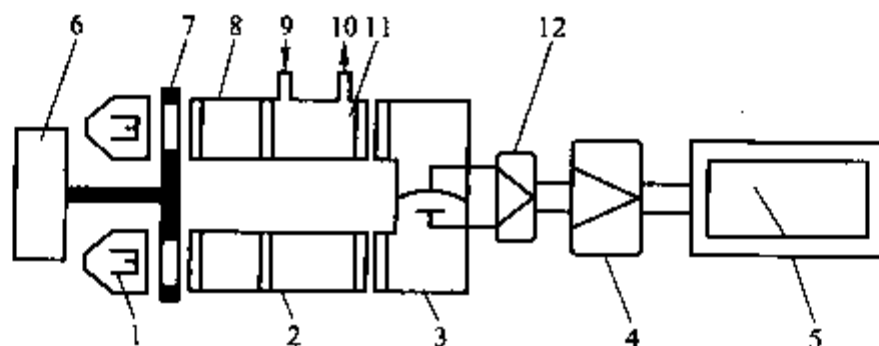


图 5-12 红外线分析原理图

- 1—红外光源；2—参比气滤波室；3—电容微音器；4—电信号放大器；
- 5—指示仪表；6—同步电动机；7—切光片；8—滤光室；9—气样入口；
- 10—气样出口；11—测量气室；12—前置放大器

### 4. 露点法和露点仪

露点是气体中水汽的饱和温度，露点与气体中水分含量有一个对应关系(表 5-18)，控制气氛热处理中就是利用这种关系采用露点仪来间接测量气体中的含水量的。

表 5-18 气体中含水量与其露点之间的对应值(0.101-325 MPa)

露点(°C)	水汽压强(Pa)	水汽量(g/m <sup>3</sup> )	水体积含量(×10 <sup>-6</sup> )	相对湿度(%) (20°C)
-70	2.59×10 <sup>-1</sup>	2.8×10 <sup>-3</sup>	2.55	1.1×10 <sup>-2</sup>
-60	1.08	1.1×10 <sup>-2</sup>	10.60	4.6×10 <sup>-2</sup>
-50	4.00	4.00×10 <sup>-2</sup>	39.40	1.71×10 <sup>-1</sup>
-40	1.29×10	1.23×10 <sup>-1</sup>	127.00	5.6×10 <sup>-1</sup>
-30	3.81×10	3.45×10 <sup>-1</sup>	376	1.63
-20	1.04×10 <sup>2</sup>	9.0×10 <sup>-1</sup>	1020	4.41
-10	2.60×10 <sup>2</sup>	2.27	2560	11.50
0	6.10×10 <sup>2</sup>	4.80	6020	26.00
10	1.23×10 <sup>3</sup>	9.40	12117	52.00
20	2.34×10 <sup>3</sup>	17.30	23079	100.00
30	3.82×10 <sup>3</sup>	30.40	41868	

测量气体露点的仪器有：露点杯、冷镜面露点仪、雾室露点仪、氯化锂露点仪、五氧化二磷露点仪和电容式露点仪等。其中，雾室露点仪是利用被测气体压缩后，在绝热条件下突然膨胀，其气体温度迅速降低，当温度降到气体露点时仪器观察室的玻璃窗上立即出现雾点的原理。此时雾室的温度即为气体的露点。雾室露点仪不需要外部冷源，便于携带，测量范围也宽（-50℃~室温），操作简单、快速，结构简单，但不能连续测量。图5-13为雾室露点仪工作流程图。测量时由于所达到的低温能保持时间太短，难以测量。为此测出刚刚出现雾状和刚不出现雾状时的压比值，根据其平均值和起始温度在专用计算尺上查出露点值。也可按公式计算。

### 5. 氧势法和氧探头

氧探头实际上是一个氧化锆氧浓差电池，其工作原理是：氧化锆在高于600℃的温度下，离解为锆离子( $Zr^{4+}$ )和氧离子( $O^{2-}$ )。当氧化锆处在氧浓度不同的环境中，或者说周围存在氧浓度差时，就会发生锆和氧离子迁移，从而导致离子导电。如果在氧化锆两侧设置一织电极，就构成了一个固体氧浓差电池。电池电动势  $E$ ：

$$E = 2.303RT/4F \lg P_{O_2}/P_{参比}$$

或 
$$E = 0.0496T \lg P_{O_2}/P_{参比}$$

式中

$E$ ——电池电动势(V或mV)；

$R$ ——气体常数[1.987 cal/(g·mol)]；

$T$ ——绝对温度(K)；

$F$ ——法拉第常数(23 060 cal/V)；

$P_{O_2}$ 、 $P_{参比}$ 和  $P_{参比}$ ——分别为待测气氛、空气和参比气体氧分压。

应用这一原理将氧化锆制成管状元件——氧探头。图5-14为氧探头结构示意图。

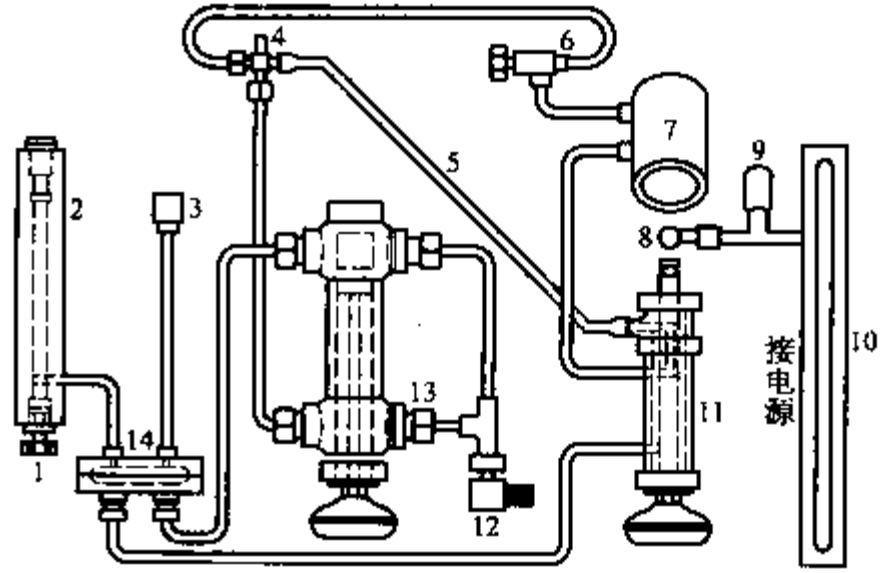


图5-13 雾室露点仪工作流程图

1—压比计调节器；2—压比计；3—加油口；4—三通阀；5—挠性管；  
6—放气阀；7—观察室；8—灯泡；9—水银开关；10—温度计；  
11—操作阀；12—进气口；13—手动泵；14—储油室

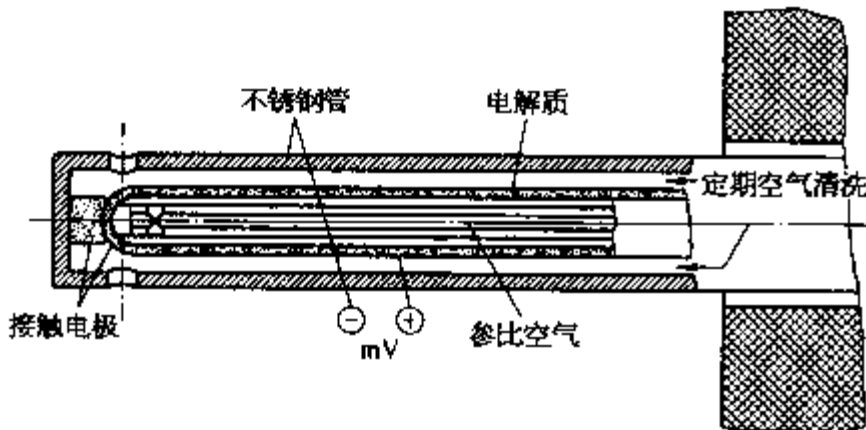


图5-14 氧探头结构示意图

## 第三节 控制气氛热处理炉

### 一、控制气氛热处理炉的特性和基本要求

控制气氛热处理炉和普通热处理炉(空气炉)的主要不同之处在于工件的热处理工艺过程基本上是在规定的气氛中进行的，因而这类炉子有其特点及相应的要求。

#### 1. 密封性

控制气氛热处理炉无论是间歇式开启炉门，还是常开式炉门(如振底炉或输送带炉等)，在炉子结构上都要求有良好的密封性，以防止空气侵入炉内，破坏炉内气氛的稳定性和防止炉内气氛气体的外泄、降低炉内气氛的压强、增加炉子的用气量，也减少了那些含有一氧化碳、氢气及甲烷等的气体对车间环境的污染和对安全造成的危害。为此，需要在炉膛内设置马弗(罐)或将炉子外壳进行连续密封焊，并将炉壳上通向炉外的孔洞或通

道,如热电偶插入孔、加热元件引出孔、搅拌风机轴孔、试样孔和探头插入孔等都用专用结构密封;常开或间歇开启炉门用火帘封门,落料口用油或水及水溶液等封口。

2. 气氛的均匀性与气体的流动

气氛气体应均匀地充满整个炉膛空间,并且不断补充新鲜气体,排出陈旧污染气体。要求合理安排进气口和排气口,设置循环风扇和导风系统,以及工件合理的装炉等。

3. 炉内气氛对炉子砌体和构件的作用

(1) 还原性气体如氢气、一氧化碳和甲烷等气体在无马弗的炉子中,直接与砌体和炉衬接触,进入材料的空隙中,与材料中的金属氧化物,如氧化铁(FeO)等作用使其还原,发生体积变化,导致耐火砌体疏松、破裂,甚至倒塌。为此,这类炉子的砌砖体材料需要限制其氧化铁的含量小于1%。

(2) 炉内气氛中的一氧化碳、氢气和甲烷等还原气体在刚开炉时会与无马弗炉砌砖微孔中的氧气、水汽和二氧化碳等氧化性气体反应及置换。这些微孔既细小,又曲折,置换过程十分缓慢。这就使无马弗炉需要一个较长的“时效”期。

(3) 在无马弗炉内的含碳气氛会使合金电热元件渗碳,改变其电阻值,影响其输出功率。含碳气氛析出的炭黑也会使电热元件短路。因此,要求采用抗渗碳电热元件,如二硅化钼元件或辐射管元件。

4. 安全问题

由于气氛中含有氢气、一氧化碳、甲烷,以及使用的原料如甲醇、乙醇、甲苯、丙酮、丙烷气和氨气等都是易燃易爆物质。其中一氧化碳、甲苯和氨气等还是有害人体健康的物质。在设计、制造和使用控制气氛炉设备时都必须认真考虑安全问题。

二、常用控制气氛热处理炉

1. 常用控制气氛热处理炉概况(表 5-19)

表 5-19 常用控制气氛热处理炉概况

炉型	炉子名称		炉内工件移动方式	选用气氛	适用工艺
周期作业炉	井式炉		人工及机械吊装进出炉	甲醇+丙酮(或煤油)、吸热式气氛和氮气+甲醇+丙酮裂解气氛等	杆类零件、散装中小零件少无氧化淬火、渗碳,碳氮共渗和氮碳共渗等
	罩式炉		人工及机械吊装进出炉	真空排气,氮气+甲醇,或氨裂解气氛	杆类零件、盘料及散装零件的少无氧化不脱碳退火等
	倾倒式滚筒炉		人工+机械装料,炉罐滚动搅翻工件,炉罐倾倒入料	甲醇+乙醇(或丙酮和煤油)等裂解气氛	小型不带尖角锐边的散装零件,如自行车钢珠和链条滚子等渗碳和碳氮共渗等
	密封箱式炉	带前室	开放式软链推拉料盘进出炉膛,升降台载料盘沉入和浮出淬火液	吸热式、氮气+甲醇、滴注甲醇+丙酮(或甲苯或煤油等)和空气+丙酮等裂解气氛	多种零件的少无氧化不脱碳淬火、渗碳、碳氮共渗和氮碳共渗等
带后室					
连续作业炉	振底式炉		炉底板往复运动的惯性使工件前移	放热式、吸热式、净化放热式、滴注甲醇+乙醇和氨裂解等气氛	中小零件少无氧化不脱碳淬火、渗碳和碳氮共渗等
	输送带式炉	网带	输送带带动工件向前移动	放热式、吸热式、净化放热式、滴注甲醇+乙醇(或丙酮、甲苯或煤油等)和氨裂解气氛等	中小零件少无氧化不脱碳淬火、渗碳和碳氮共渗等
		铸链带			大中型零件少无氧化不脱碳退火、正火、淬火,以及渗碳和碳氮共渗等

(续表)

炉型	炉子名称		炉内工件移动方式	选用气氛	适用工艺
连续作业炉	推杆炉	贯通式	一个大推杆推动载有工件的料盘向前移动,通过炉膛	放热式、吸热式、净化放热式、氮气+甲醇、滴注甲醇+丙酮(或煤油或甲苯)裂解气氛等	各类零件少无氧化不脱碳退火、正火、淬火、渗碳和碳氮共渗等
		多室式	由多个炉膛组合而成,每个炉膛有各自推杆推动料盘	吸热式、氮气+甲醇、滴注甲醇+丙酮(或煤油或甲苯)裂解气氛等	多类零件的渗碳和碳氮共渗等
	辊底炉		转动的辊子带动工件或料盘向前移动	吸热式、氮气+甲醇裂解气氛等	多种零件的少无氧化不脱碳正火、淬火、渗碳和碳氮共渗等
	转底炉		旋转的炉底带动工件或料盘移动	吸热式、净化放热式和氮气+甲醇裂解气氛等	少无氧化不脱碳淬火、渗碳和碳氮共渗等

## 2. 周期作业炉

1) 倾倒式滚筒炉 这种炉型适宜作小工件的渗碳、碳氮共渗和光洁淬火等处理。炉体内是一可以绕其中心轴旋转的炉罐,罐的一端开口,装入工件后用盖密封。炉罐的另一端插入气氛的进气管或者液体碳氢化合物的滴注管。炉罐有圆形的,罐内装有翻炒板,加强炉内工件翻滚;也有八角形的炉罐。其优点是既加强工件的翻滚,又减少了工件间的碰撞。在完成工艺周期后,通过机械传动装置使炉体倾斜,将工件倒入淬火槽。表5-20列出了RG系列倾倒式滚筒炉的规格及技术参数。

表5-20 RG系列倾倒式滚筒炉规格及技术参数

规格	RG-30-9	RG-45-9	RG-60-9	RG-120-9
额定功率(kW)	30	45	60	120
额定温度(°C)	950	950	950	950
炉罐尺寸(mm)	φ300×620	φ520×680	φ600×750	φ750×10000
空炉升温时间(h)	≤2	≤2	≤2.5	≤2.5

2) 密封箱式控制气氛炉 密封箱式炉是目前生产上应用较多的一种炉型,可用于少无氧化淬火、正火、淬火、渗碳、碳氮共渗和氮碳共渗等热处理工艺。因此在实际生产中习惯称为多用炉。图5-16为一种典型的密封箱式炉结构示意图。

密封箱式控制气氛炉一般由加热炉膛、前室、淬火槽和推拉料机等部分组成,加热炉膛实际上是一个箱式控制气氛炉;目前采用无马弗结构;用抗渗碳砖或耐热抗渗碳陶瓷纤维构成炉衬;使用耐热钢或陶瓷加热辐射管;也可使用二硅化钼(MoSi<sub>2</sub>)等非金属的抗渗碳的加热元件;加热炉膛顶部装有搅拌风机,有些炉膛中装有半马弗罩,作为搅拌风机的导风系统;前室位于加热炉膛前,淬火槽上方,用钢板密封焊接构成;前室与加热室之间有中间炉门(也称内炉门)相通;它能隔热,但不密封。当其关闭时,加热室的气氛气体可以通过中间炉门上的小孔和门与门框之间的间隙流入前室。前室还有一外炉门,供进出料之用,它也是前室与空气隔绝的门。外炉门和前室门框之间有着良好的密封。在外炉门的门框下方设置一火帘装置。当外炉门开启时,火帘打开可以减少空气进入前室。前室是加热室与淬火槽之间的缓冲室和保护室。工件在进入加热室前,先在前室停留一段时间,使与工件一起进入前室的空气得以置换,不让其在下一步工件进入加热室时破坏炉膛内的气氛。另外,高温状态的工件在进入淬火液前,在前室气氛保护下避免了氧化和脱碳。前室装有升降台,供装料盘进出炉膛和淬火槽。

有些密封箱式炉设有缓冷室以满足正火和渗碳后二次加热等工艺的要求。缓冷室有两种:①侧室——设在前室中的一侧,与前室可有隔热隔气的炉门;②顶室——设在前室的上部,也有顶盖炉门隔热隔气。设有缓冷室的前室都有热交换装置,以带走缓冷室中工件释放出来的热量。

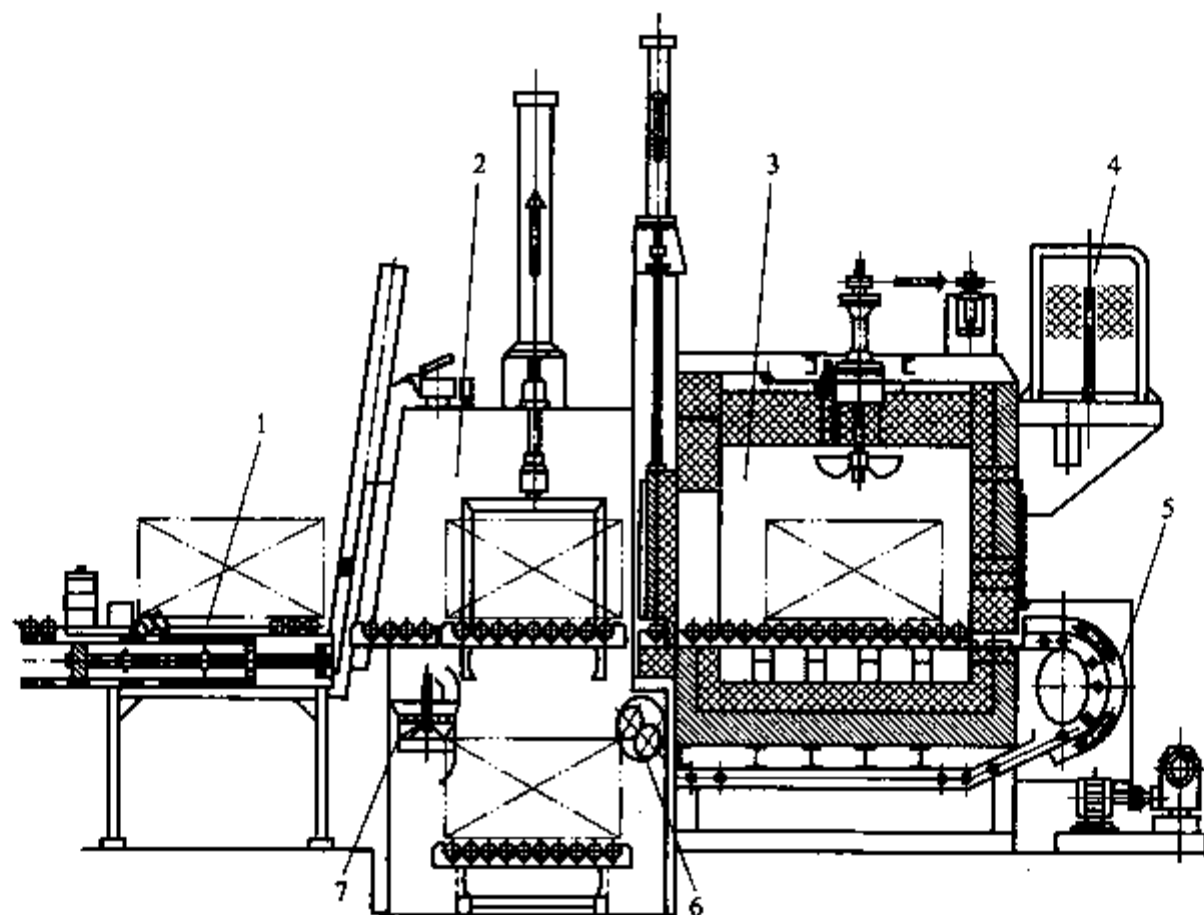


图 5-15 密封箱式控制气氛炉典型结构示意图

1—前推拉料机；2—前室；3—加热室；4—加热用变压器；5—后推拉料机；6—液面泵；7—油搅拌机

淬火槽设有加热和冷却系统，调节淬火液的温度。调温系统还包括控制淬火液流入流出量的液体泵。另外还有一个保持淬火槽液面的平液系统和搅拌及导流系统等。密封箱式炉的进出料装置有两种型式：① 前后推拉式——图 5-15 中显示的就是这种型式，进出料机构分前后两部分，都由机械传动，推动一根开式链条在安装在炉床上的链条盒中的导向槽上往复行走，并由安装在链条端部的推头和拉钩实施推拉料盘的动作。前推拉料机将料盘推送到前室，然后由后推拉料机开式链条穿过加热室，伸到前室将料盘拉进加热室；出料时，则由后推拉料机将料盘推到前室，经淬火、淋油后由前推拉料机拉出前室。② 前推拉式——这种炉型只有前推拉料机，没有后推拉料机。料盘在前室等待换气后，仍由前推拉机继续推送到加热炉膛。前推拉机则退到炉外。出料时，前推拉料机开式链条穿过前室，伸到加热室将料盘拉回到前室，经淬火、淋油后再拉出前室。两种型式的推拉料机各有优缺点：前后推拉料机行程短，炉前机构占地少，炉门密封性好；缺点是增加了一套机构的制造和维护成本；后推拉料机的推头和拉钩等零部件也需用耐热钢制造。前推拉料机的优点是机构简单，不需要用耐热钢；缺点是当将料盘从前室推到加热室时，推拉料机必须穿过前室炉门下方的特设的小门，带入一些空气，影响前室的气氛。

密封箱式炉适用的气氛有多种，常用的有：吸热式气氛、净化放热式气氛、氮气+甲醇气氛、甲醇裂解气氛和丙酮+空气裂解气氛等。

密封箱式炉的应用日益广泛，其应用形式也多样化，通行的做法是根据生产纲领将一台或多台密封箱式炉与相应数量的清洗机、回火炉、剪式升降台和横移小车等组合成自动生产线。生产线具有较高的生产效率和多品种规格工件的适应性。

表 5-21 列出几种型号密封箱式炉的规格、技术参数。

表 5-21 几种型号密封箱式炉的规格、技术参数

规格	30 型	45 型	75 型	105 型
额定功率(kW)	30	45	75	105
额定温度(℃)	950	950	950	950
炉膛尺寸(长×宽×高)(mm)	600×300×200	750×500×400	700×600×450	900×750×500
最大装载量(kg)	125	200	300	500

### 3. 连续作业炉

1) 振底式控制气氛炉 振底式炉是一种较为简单的连续作业的控制气氛炉。炉子有一活动炉底板,通过一个振动机构使其在炉内作往复运动,将所处理的工件按一定节拍作连续脉动状传送。市场上有电磁式、气动式和机械式振动机构。电磁式适用于处理小零件的小型炉子;气动式和机械式适用于中小零件的中小炉子。活动炉底板有用耐热钢制作,也有用非金属碳化硅(SiC)制作。振底炉的优点是机电一体化程度好,结构又简单;缺点是工件传送速度在炉底板横向分布不均匀,两侧面速度小,中心速度大。

2) 网带式控制气氛炉 网带式炉是输送带式炉的一种。其输送带是由耐热金属丝编织成的网带。网带有一定宽度,有柔性,可弯曲,具有一定的拉伸强度;首尾相接,在贯通式炉膛内,由机械驱动循环运转。热处理工件放置在网带上,由其带动从炉膛入口移向出口端。显然,由网带传送工件,热处理工艺时间可以得到保障,工件也不会发生碰撞。

网带式炉有带马弗(罐)和无马弗(罐)两类。图 5-16 为带马弗的网带炉结构示意图。

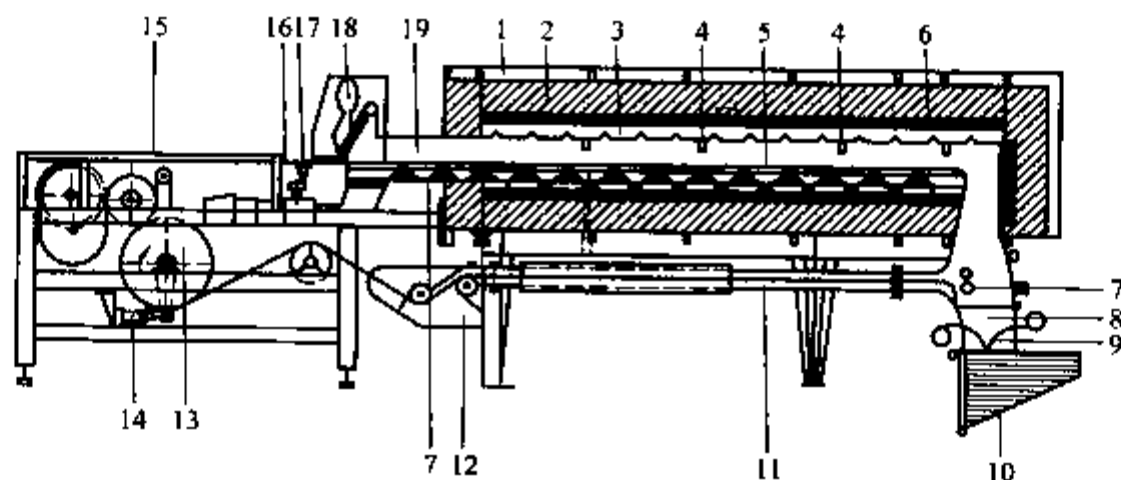


图 5-16 带马弗的网带控制气氛炉结构示意图

1—炉壳; 2—炉衬; 3—加热室; 4—热电偶; 5—活动炉底板; 6—电热元件; 7—气体进口;  
8—下落通道; 9—淬火液帘; 10—淬火槽; 11—网带返回通道; 12—水封; 13—驱动轮;  
14—气缸; 15—装料台; 16—网带; 17—炉底板驱动机构; 18—火帘; 19—马弗

马弗贯通炉膛,进料端向大气开口,出料端向下弯 90°,形成下落通道,插入淬火槽的淬火液中,成为有效的液封。在淬火液上方,下落通道有一个 T 形结构,向炉子的进料端伸出网带的返回通道,网带由此通过回到进料端,完成网带的循环运转。这个通道是密封的,在网带出口处设置了水封,保证返回通道不会漏进空气。马弗的进料端设有常开启一定高度的炉门和火帘,减少空气进入马弗内,使马弗内气氛稳定。

无马弗炉炉壳采用全密封焊接,加热元件、热电偶、气体取样管和氧探头等插入口都要进行密封。加热采用辐射管。网带由炉内许多根托辊支撑,并带动前进。这些托辊按一定距离排列在炉底同一水平面上,形成网带的支撑面。托辊两端伸出炉外,由密封自润滑轴承支承,并由电机、链轮和链条传动。

表 5-22 列出了 RCWF 系列马弗网带式控制气氛炉的规格、技术参数。

表 5-22 RCWF 系列马弗网带式控制气氛炉的规格、技术参数

型号规格	工作尺寸(长×宽×高)(mm)	额定功率(kW)	生产率(淬火)(kg/h)	额定温度(°C)
RCWF24-9	1 300×150×50	24	20~30	920
RCWF45-9	2 100×220×50	45	30~60	920
RCWF60-9	2 400×300×60	60	60~100	920
RCWF70-9	3 200×300×60	70	90~120	920
RCWF100-9	3 200×400×75	100	120~180	920
RCWF120-9	3 800×400×75	120	160~200	920
RCWF150-9	4 300×400×75	150	200~250	920

3) 铸链式控制气氛炉 铸链式炉也是一种输送带式炉。其输送带是用耐热钢精密铸造成链节片,组装成



链带。铸链式控制气氛炉都是无马弗的。适用于较大的零件热处理。这种炉型可配置淬火槽、上料机、清洗机和回火炉等设备组成生产自动线。

表 5-23 列出的是几种型号铸链带式炉的规格、技术参数。

表 5-23 几种型号铸链带式炉的规格、技术参数

型 号	额定功率(kW)	额定温度(°C)	炉膛尺寸(长×宽×高)(mm)
RJC-120-7	120	700	4 110×600×415
RJC-180-9	180	900	4 180×400×200
NS-83-33	350	900	6 520×600×200
NS-83-34	250	700	9 000×600×250
NS-83-251	180	900	4 180×400×200

4) 推杆(盘)式控制气氛炉 推杆式炉的炉床是固定的。装载着工件的料盘(料筐或夹具)搁置在炉床上的两条平行而有一定距离的导轨上。推杆推动料盘向前移动。每推动一次炉内所有料盘向前移动一个料盘的距离。料盘在炉内就实现了脉动式移动。导轨有耐热铸钢的,也有非金属的碳化硅(SiC)制件。

目前的推杆炉都是无马弗或半马弗的。半马弗实际上是风扇的导风罩。炉子按照无马弗控制气氛炉的要求设计和制造。图 5-17 为推杆式控制气氛炉结构示意图。推杆炉适用性较广,可以用于少无氧化退火、正

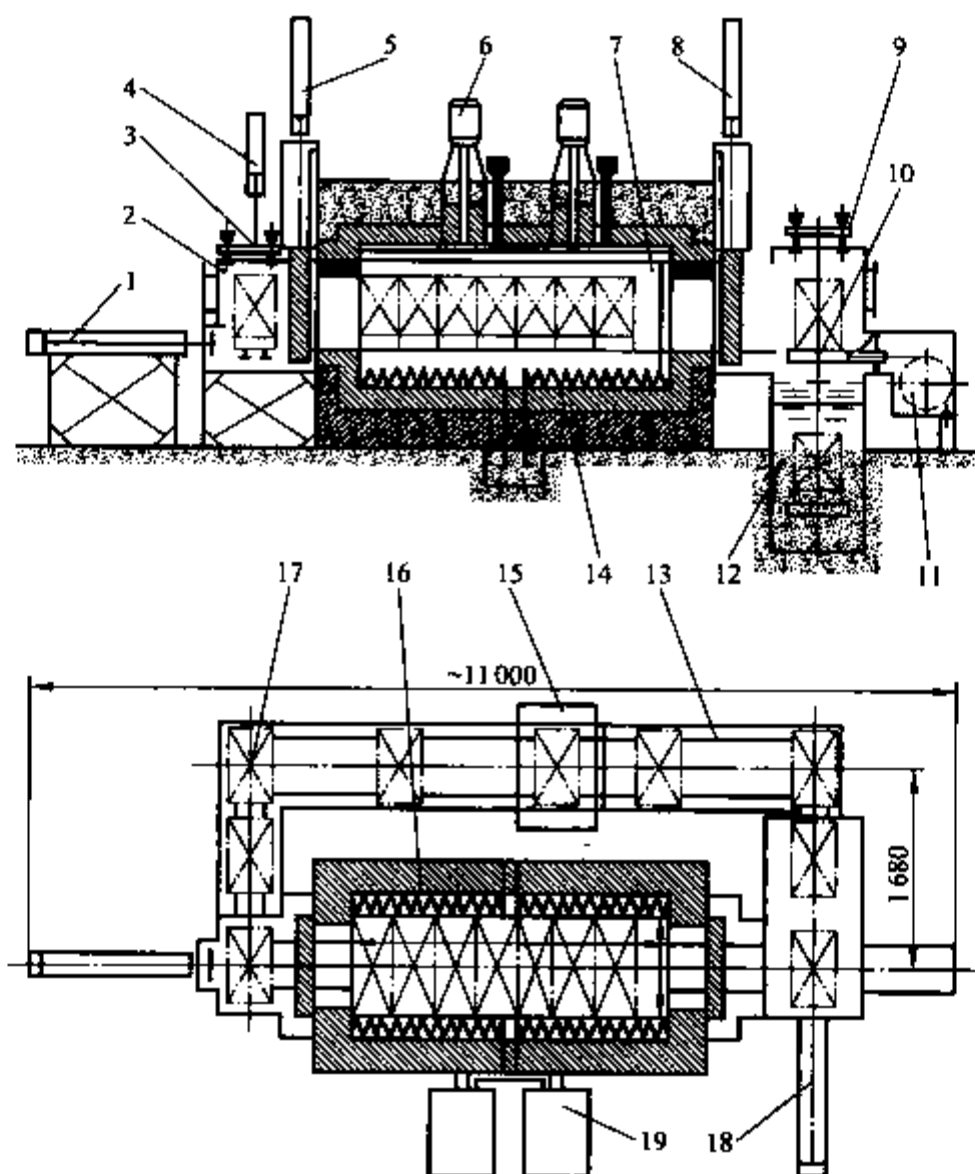


图 5-17 推杆式控制气氛炉结构示意图

- 1—前推料液压缸; 2—装料前室; 3—防爆装置; 4—前室门液压缸; 5—前炉门液压缸;  
6—搅拌风扇; 7—炉体; 8—后炉门液压缸; 9—后室; 10—淬火升降台; 11—后室拉料机;  
12—淬火槽; 13—炉外纵向运料机; 14—炉底加热电阻板; 15—清洗机; 16—炉侧加热电阻板;  
17—前侧进料机; 18—淬火液下推料液压缸; 19—加热用变压器

火、淬火、渗碳、碳氮共渗、渗氮和氮碳共渗工艺等。推杆炉生产效率高,有双排,甚至三排推料的;炉子吞吐量大,特别适用于品种规格单一、产量大的生产场合。

推杆炉所使用的装料盘与工件一同加热,一同进入淬火液冷却,增加了额外的能耗。不断加热、冷却过程也使料盘易变形、易开裂,增大了炉子运行成本。另外,推杆炉如果要调整工艺,需要把炉膛内所有料盘上的工件都要推出去。这样就增加炉子的空运转时间,降低了炉子的使用效率。

表 5-24 列出几种型号推杆式控制气氛炉的规格、技术参数。

表 5-24 几种型号推杆式控制气氛炉的规格、技术参数

项 目	65 型	140 型	160 型	180 型	200 型
额定功率(kW)	65	140	160	180	200
额定温度(°C)	950	950	850	950	800
炉膛尺寸(mm)	3 000×300×150	4 500×600×400	11 800×720×516	5 400×600×400	13 400×850×550

5) 连续滚筒式控制气氛炉 连续滚筒式炉也称为鼓型炉。这种炉型不同于周期型倾倒式滚筒炉,其旋转滚筒安装在炉架上,炉体不可倾倒。滚筒内部有螺旋筋板。工件从入口端进入滚筒后,随着滚筒的旋转,在螺旋筋板的导向作用下,连续移向滚筒的出口端。其滚筒不是马弗。炉膛和滚筒内同时存在控制气氛,并且相通,因此其炉膛是按无马弗炉设计制造。滚筒式炉常与淬火槽、清洗机和回火炉等设备配套,组成自动生产线用作轴承滚动体(钢球或滚柱)或油泵偶件光洁淬火处理。图 5-18 为连续滚筒式控制气氛炉自动生产线示意图。表 5-25 列出两种型号连续滚筒炉的规格、技术参数。

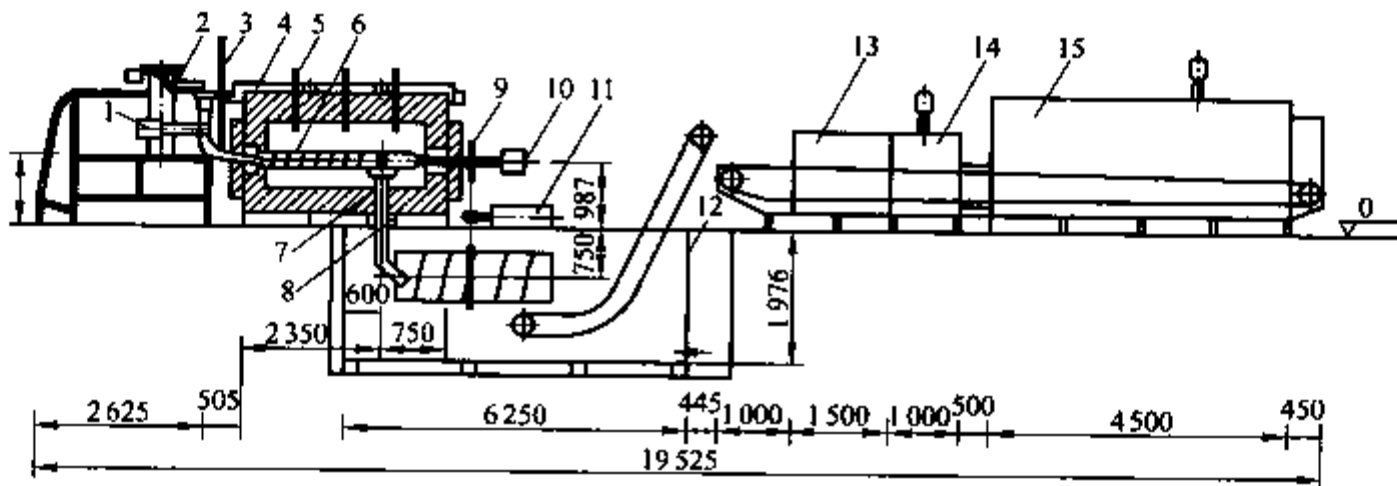


图 5-18 连续滚筒式控制气氛炉自动生产线示意图

1—闸板式进料装置; 2—电磁振动落料斗; 3—排气管; 4—滚筒式炉; 5—热电偶; 6—内部带有螺旋筋的滚筒;  
7—工件落料管; 8—气氛进气管; 9—滚筒传动链轮; 10—气氛进气管; 11—传动装置;  
12—淬火槽; 13—清洗机; 14—烘干炉; 15—网带回火炉

表 5-25 连续滚筒式控制气氛炉的规格、技术参数

型 号	额定功率(kW)	额定温度(°C)	炉膛尺寸(mm)
G-30	30	830	φ200×1 200
G-70	70	920	φ310×2 000

## 第四节 控制气氛热处理操作的安全

安全在控制气氛热处理操作中是一个需要十分关注的问题。由气氛所引起的问题有四个方面: 燃烧、

爆炸、窒息和中毒等。

## 一、预防火灾和爆炸

易引起燃烧和爆炸的气氛气体有氢气、氨气、一氧化碳和甲烷等,制备气氛的原料有天然气、液化石油气(丙烷气、丁烷气和丙-丁烷气等)、甲醇、乙醇、丙酮、甲苯、二甲苯和煤油等。其中,最危险的是氢气。

表 5-26 常用可燃气体的危险浓度

可燃气体	气体在空气中的危险浓度(%)	
	下限	上限
氢气	4	75
一氧化碳	12	75
甲烷气	5	15
丙烷气	2.2	7.3
丁烷气	2	8.5
氨气	13	26

燃烧有三要素:燃烧物质(可燃气体、液体或固体)、助燃物(氧气)和温度(高于可燃物质闪点或着火点温度)。常见的三种易燃气体的着火温度分别为:氢气 530℃,一氧化碳 610℃,甲烷 630℃。

燃烧会引起火灾,但可耗去燃料和氧气,减少或消除爆炸的危险。爆炸是瞬时发生的激烈过程,危害性极大。当可燃性气体在空气中达到某一浓度时即可发生爆炸,这一浓度称为某气体的爆炸浓度,也称某气体的爆炸极限。表 5-26 列出了常见可燃气体的危险浓度。不使可燃气体在空气中达到危险浓度,是防止爆炸的重要内容。

控制气氛热处理的爆炸事故常常发生在开炉、停炉或停电等炉子故障时,为此应采取以下安全措施:

(1) 通入或停止通入可燃性(含有氢气、一氧化碳、甲烷和氨气等)气氛时,炉温必须达到或保持在高于 760℃,保证可燃气体燃烧,以便耗尽氧气或可燃性气体,使混合气达不到爆炸范围;

(2) 对于工艺温度低于 760℃的炉子(如工艺温度 550℃的氮碳共渗炉)则采用特殊开炉措施,如开炉时通入氮气或在炉膛内接近进气口处使用移动点火炬,也可将炉温升至 760℃,安全通入炉气后再降温至 550℃,实现安全操作;

(3) 通入 5 倍炉膛容积的中性气体——氮气,驱赶净炉膛中的空气。这一方法适用于高于或低于 760℃的热处理炉,适用于开炉也适用于停炉操作,更适用于排除炉子故障的操作。

## 二、预防窒息和中毒

窒息的本质是缺氧。正常的空气中含有近 21%的氧气,可以保证人体正常生理活动所需要的氧气;一旦空气中的氧气少了,就会对人体产生影响,以致窒息。

表 5-27 为空气中不同的含氧量对人体的影响。除了正常的空气外,其他不含氧气或少含氧气的气氛气体均能引起窒息。

一氧化碳是多种控制气氛中的一种最危险的组分,是通过呼吸道进入人体内的致毒剂。卫生常识告诉人们:氧气与血液中红血球形成含氧血红蛋白,在人体组织中释放出氧而再成为血红蛋白,完成了氧在人体内的输送。一氧化碳与血红蛋白的结合能力是氧的 300 倍。这一结合阻止了人体中氧的输送,使人体得不到正常的氧气供应,从而危及人的生命。硫化氢气体也有类似的作用,危及人的生命。

麻醉性气体使中枢神经系统麻醉,使人易于疲劳、语无伦次、昏迷或处于麻醉状态,以致失去知觉或发生瘫痪,甚至死亡。所有挥发性的碳氢化物都可能引起麻醉。

刺激性气体影响人体黏膜,如呼吸道和眼睛,严重时能引起休克和血液循环障碍。长时间处于有刺激性气体环境中,即使浓度不高,也会降低人体的免疫力。

在控制气氛热处理中常见的能引起人体中毒的有毒有害气体有一氧化碳、氨气、二氧化碳、二氧化硫、硫化氢和氮的氧化物等。表 5-28 列出了这些气体的情况。

表 5-27 空气中不同含氧量对人体的影响

空气含氧量(%)	对人体的影响
12~16	增加心跳速度
10~14	大脑受影响,判断能力下降,极易疲劳等
6~10	恶心、呕吐、昏迷甚至失去知觉
6 以下	呼吸困难、心慌和惊厥

表 5-28 常见的有毒有害气体的情况

气体及分子式	气体的性能	对人体的影响	危害浓度
一氧化碳 CO	无色、无嗅、无味	血液中毒、引起窒息	$>5 \times 10^{-3} \%$
氨气 NH <sub>3</sub>	无色、有刺激性气味。嗅到气味的临界值大于 $5 \times 10^{-4} \%$	刺激呼吸道和眼睛	$>5 \times 10^{-3} \%$
二氧化碳 CO <sub>2</sub>	无色、少许酸味、有刺激性气味	有空气存在时有麻醉作用,无氧时窒息	$>5 \times 10^{-1} \%$
二氧化硫 SO <sub>2</sub>	无色、有刺激性气味。嗅到气味的临界值大于 $8 \times 10^{-4} \%$	严重刺激呼吸道和眼睛	$>5 \times 10^{-4} \%$
硫化氢 H <sub>2</sub> S	无色、有令人不愉快的气味。嗅到气味的临界值大于 $1 \times 10^{-5} \%$	刺激呼吸道,并引起神经中毒	$>2 \times 10^{-3} \%$
氮的氧化物 NO、NO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	NO 使血液中毒,其余为刺激性气体	窒息、对神经系统的麻醉作用、对呼吸道等有刺激作用	$>5 \times 10^{-4} \%$

### 1. 一氧化碳气体

含碳气氛(如吸热式、放热式、甲醇裂解和氮气-甲醇裂解气氛等)中都含有不同浓度的一氧化碳。其中甲醇裂解气氛中一氧化碳浓度可达 33%。

一氧化碳是一个“隐形杀手”。它无色、无嗅,没有专门装置很难测出它的存在。它的相对密度与空气差不多,既不沉聚在地面附近,也不从高处跑掉,而是与空气混合在一起。因此,为了发现它的存在,最好安装一氧化碳检测报警器,以保证安全。

避免一氧化碳的危害的措施之一,是排出的炉气要烧掉或直接排到车间外面的大气中;另一方面是保持车间内良好的通风。尽量使车间内空气中有害的气体处于低浓度状态。不同浓度的一氧化碳对人体的危害程度是不同的。表 5-29 列出了不同浓度 CO 的危害程度。

表 5-29 对应不同浓度 CO 对人体的危害程度

浓 度		对人体的影响
ppm	%	
100	0.01	对健康有害,但相对长的时间内可以忍耐
400~500	0.04~0.05	耐受 1 h
1 500~2 000	0.15~0.20	超过 1 h 有生命危险
4 500	0.45	会引起立即死亡

### 2. 氨气

氨气通常作为氨分解气氛、氨燃烧气氛、渗氮气氛、碳氮共渗气氛和氮碳共渗气氛的原料气和添加气应用。

氨气无色,比空气轻,在很低的浓度时就会发出一股刺鼻的气味,告诉人们它的存在。在车间中稍有泄漏,很快就会被发现,不需要专门的检测仪器。

氨气对人体的鼻腔、眼睛和咽喉等都有很强的刺激作用,浓度高时会引起咳嗽、窒息、眩晕和呕吐。空气中氨气低于  $5 \times 10^{-3} \%$  时对人体没有危害性;而浓度高于  $1.5 \times 10^{-2} \%$  时对人体有明显生理反应;当浓度达到 0.2%~0.3% 时可能有生命危险。空气中不同氨气浓度对人体的影响见表 5-30。

### 3. 二氧化碳

在含碳气氛(如吸热式、放热式、甲醇裂解和氮气-甲醇裂解气氛等)中都有不同浓度的二氧化碳,其中放热式气氛中含有较多的二氧化碳。有些车间灭火器中也装有经过压缩的二氧化碳气体。

二氧化碳气体是无色、无嗅,相对密度大于空气,沉聚在地面附近。

当空气中二氧化碳浓度超过 6% 时,会使人感觉到气短,引起头痛、眩晕、神经兴奋、昏厥和痉挛等。它的局部反应是皮肤变红,刺激呼吸器官和眼睛;浓度为 10%~20% 时,会使人失去知觉,窒息、停止呼吸而死亡;浓度超过 20% 时能引起立即死亡。

表 5-30 空气中不同氨气浓度对人体的影响

空气中氨气的浓度		对 人 体 的 影 响
$\times 10^{-4}\%$ (ppm)	%	
250	0.025	可嗅出氨的气味
50~100	0.005~0.01	最大允许浓度
200~300	0.02~0.03	允许 1 h 的短时操作
400~500	0.04~0.05	引起咽喉疼痛
600~700	0.06~0.07	引起眼睛疼痛
1 700	0.17	引起咳嗽
2 500~4 500	0.25~0.45	0.5 h 操作有生命危险
5 000	0.50	短时间操作会快速致命

#### 4. 二氧化硫和硫化氢

二氧化硫和硫化氢存在于用含硫的原料气制备的气氛(如放热和吸热式气氛等)中。它们都是无色气体,但都有气味,二氧化硫有刺鼻和窒息的酸味,硫化氢有坏鸡蛋的刺激性气味,很容易被发现。二氧化硫在很小浓度时,会刺激黏膜,引起咽痛和胸痛;在高浓度时,强烈刺激呼吸器官引起窒息,失去知觉。硫化氢对人体的影响起初是恶心、疲倦,后来就呕吐、眩晕、头痛、腹泻,强烈刺激眼睛、鼻子和呼吸器官。其浓度为  $1 \times 10^{-2}\%$  时产生轻微症状;在  $0.05\% \sim 0.1\%$  的浓度中待  $0.5 \sim 1$  h 可能引起危险;如果大于  $0.1\%$  则会危及生命。

#### 5. 氮的氧化物

氮的氧化物产生于气氛制备过程中。如制备放热式气氛和氨燃烧气氛时,燃烧温度高于  $1\ 200^{\circ}\text{C}$  即可产生  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}_x$  等氮的氧化物。氮的氧化物对人体的影响:浓度低时头痛,刺激咽喉;浓度高时会发生喘不过气、惊厥和流涎等症状。低于  $5 \times 10^{-2}\%$  时,不会引起注意;高于  $5 \times 10^{-4}\%$  则会使人不能忍受。在  $2 \times 10^{-2}\% \sim 3 \times 10^{-2}\%$  时则会有生命危险,即使短时间也不能幸免。

### 三、车间安全生产指南

在使用控制气氛的热处理车间可以从下面三个方面落实安全措施:

#### 1. 车间规章制度

建立必要的、切实可行的车间安全规章制度,包括:

- (1) 车间内控制气氛热处理炉开炉、停炉、排除故障和设备维护保养等操作守则;
- (2) 控制气氛发生器的操作和维护管理规程;
- (3) 控制气氛气源,即可燃性气体、液体储存站及所使用的压力容器的管理规则。

#### 2. 控制气氛热处理设备安全操作和管理

(1) 购置或建造的控制气氛热处理炉和气氛发生器等设备的设计和制造必须符合有关安全的规定,并经验收合格,出具合格证书;压力容器必须符合有关规定及相关证件。

(2) 控制气氛热处理炉和气氛发生器等设备制造商所提供的使用说明书应包括相关的安全操作的内容。如开炉、停炉和排除故障等安全操作,以及设备中安全设施的维护保养等。并就这些内容对操作及相关人员进行培训。

(3) 购置的设备验收应包括安全设施的验收。

#### 3. 人员培训

控制气氛热处理操作人员及相关管理人员应经过安全培训后上岗。培训内容应包括:控制气氛热处理炉和气氛发生器的启动、关闭和故障排除的安全操作,以及原料气(液)储存站安全管理等。此外,还应熟悉和掌握消防设备使用方法和人员急救措施等。

工件加热奥氏体化后,以适当方式冷却获得马氏体或(和)贝氏体组织的热处理工艺称为淬火。淬火冷却指工件进行淬火处理时,在整个淬火周期中的冷却部分。工件进行淬火冷却时用的介质称为淬火冷却介质。常用的淬火冷却介质有油、水及盐或碱的水溶液、有机聚合物水溶液,另外还有熔盐、空气、金属等。

钢件淬火过程的组织变化,可以用钢的过冷奥氏体等温冷却转变图和过冷奥氏体连续冷却转变图来分别反映钢在奥氏体化后,等温冷却和连续冷却的相变规律,可作为制定热处理工艺的主要依据。

## 第一节 钢的过冷奥氏体冷却转变

### 一、过冷奥氏体等温冷却转变

#### 1. 过冷奥氏体等温冷却转变图

过冷奥氏体等温冷却转变图的形状同英文字母 C,故称为 C 曲线,亦称 TTT 图(Time Temperature Transformation, TTT)。该图主要说明钢的过冷奥氏体在不同过冷度下的等温过程、转变温度、转变时间、转变产物、转变开始和终了的关系。图 6-1 是共析钢的过冷奥氏体等温转变图。表 6-1 是过冷奥氏体等温冷却转变产物和硬度。

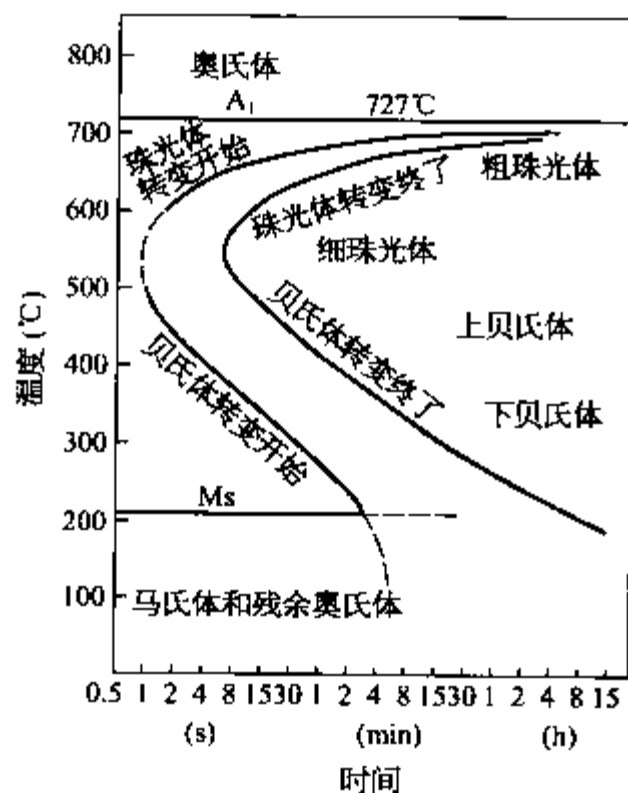


表 6-1 共析钢过冷奥氏体等温冷却转变温度、组织和硬度

等温转变温度 (°C)	组 织	片间距或形貌 (μm)	硬 度 HRC
700	珠光体	0.6~0.7	15
662	索氏体	0.25	31
580	托氏体	0.1	41
496	上贝氏体	羽毛状	42
400	下贝氏体	针状	56
<240	马氏体	针状	58~65

图 6-1 共析钢过冷奥氏体等温冷却转变曲线

#### 2. 几种典型的过冷奥氏体等温冷却转变曲线

根据 C 曲线的形状和珠光体、贝氏体转变区相互位置不同,曲线大致可分为六种主要类型。

(1) 单 C 曲线, 见图 6-2。主要是碳素钢和含不形成碳化物元素的合金钢, 如 65Mn、40Ni、60Si2Mn、T8 等。

(2) 双 C 曲线, 见图 6-3。贝氏体曲线偏左, 珠光体曲线偏右。主要含有 Mo、Mn、Si、Cr 元素的合金结构钢, 如 40Cr、20CrMo、35CrMo、42CrMo、40CrMnMo 等。

(3) 双 C 曲线, 见图 6-4。贝氏体曲线偏右, 珠光体曲线偏左。主要含有形成碳化物合金元素 W、Cr、Mo、V 的高碳合金钢, 如 Cr12、Cr12MoV、W6Mo5Cr4V2、9CrSi、9Mn2V 等。

(4) 仅有贝氏体的 C 曲线, 见图 6-5。主要是低碳、中碳含有较高 Mo、W、Cr、Ni、Mn 元素的钢, 如 18Cr2Ni4WA、18Cr2Ni4MoA、25Cr2Ni4WA、35Cr2Ni4MoA。

(5) 仅有珠光体的 C 曲线, 见图 6-6。主要是中碳、高碳的高 Cr 钢, 如 10Cr13、20Cr13、40Cr13。

(6) 仅有碳化物析出线的 C 曲线, 见图 6-7。主要是有碳化物析出的奥氏体钢, 如 4Cr4NiW2Mo。

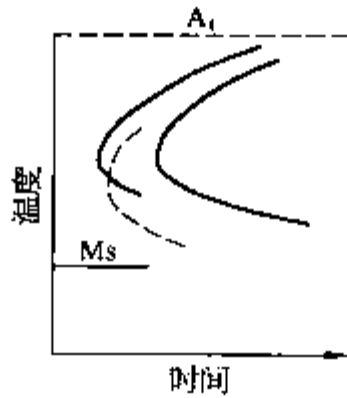


图 6-2 单曲线类型

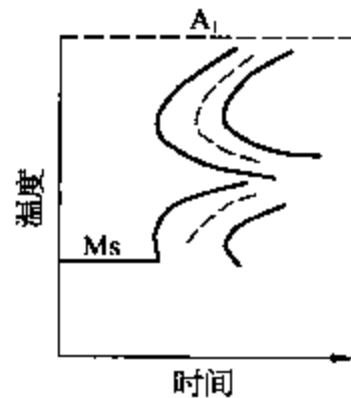


图 6-3 双曲线类型

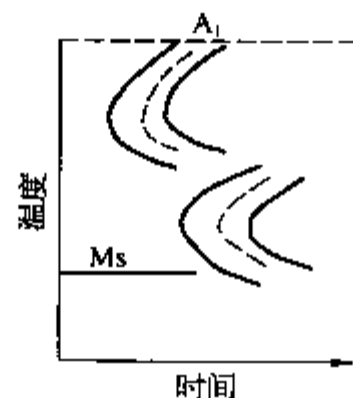


图 6-4 双曲线类型

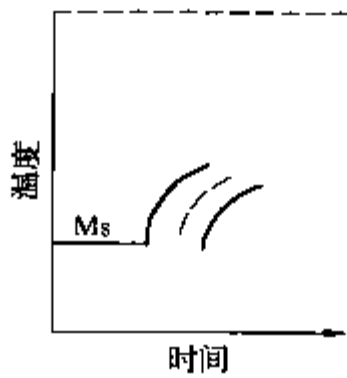


图 6-5 仅有贝氏体曲线类型

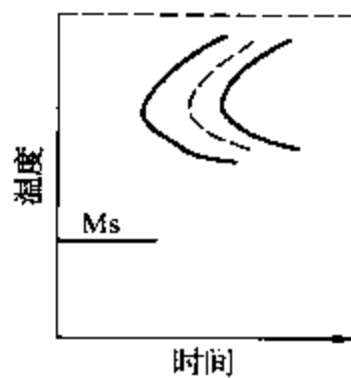


图 6-6 仅有珠光体曲线类型

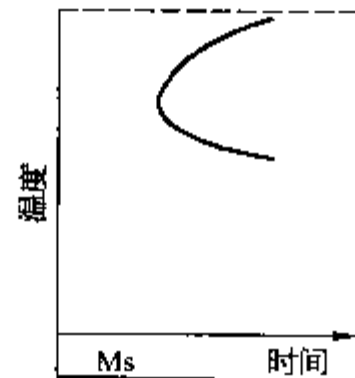
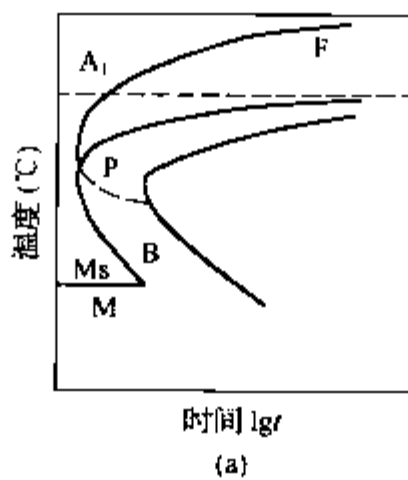


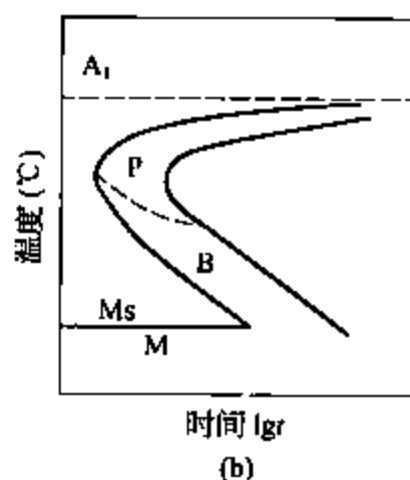
图 6-7 仅有碳化物析出线类型

### 3. 影响 C 曲线的因素

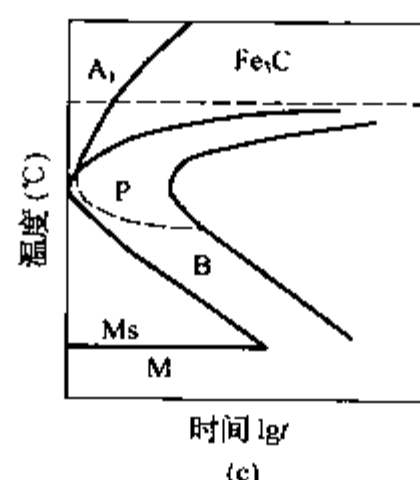
1) 碳的影响 见图 6-8。



(a)



(b)



(c)

图 6-8 亚共析钢、共析钢和过共析钢的 C 曲线

(a) 亚共析钢; (b) 共析钢; (c) 过共析钢

(1) 亚共析钢和过共析钢比共析钢多了一条先析相的析出线: 亚共析钢为先析铁素体析出线; 过共析钢是

先析渗碳体析出线。

- (2) 亚共析钢的 C 曲线随碳的质量分数增加向右移; 过共析钢的 C 曲线随碳的质量分数增加向左移。  
 (3) 随着钢碳的质量分数增加, 贝氏体转变的孕育期延长。

2) 合金元素的影响 见图 6-9。

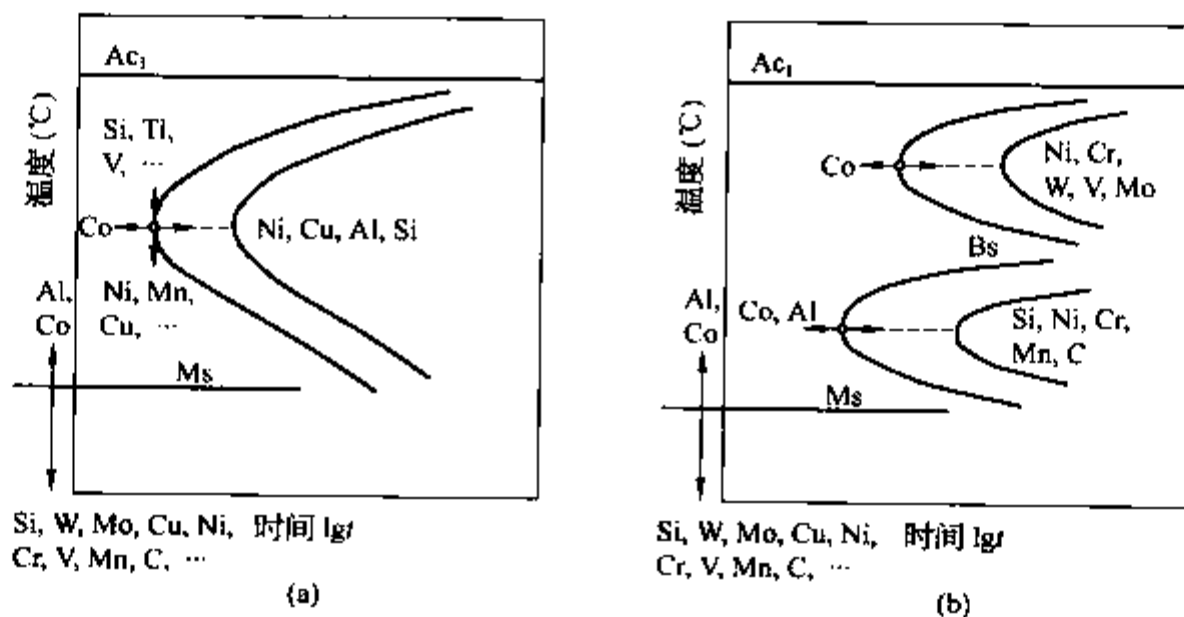


图 6-9 合金元素对过冷奥氏体等温转变曲线的影响

(a) 含有不形成碳化物及形成少量碳化物元素的钢; (b) 含有形成较多量碳化物元素的钢

3) 加热温度的影响 提高加热温度, 使碳及合金元素充分溶入奥氏体中, C 曲线右移, 而且珠光体、贝氏体鼻尖分离。图 6-10 是 GCr15 钢经不同温度加热测得的 C 曲线。

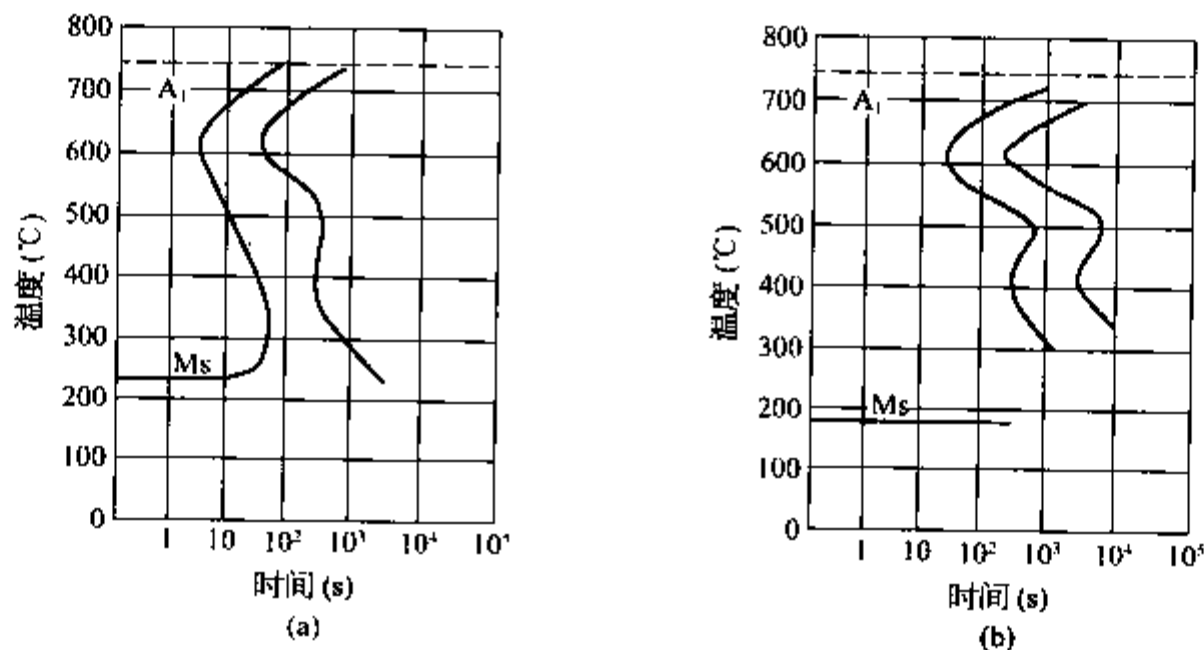


图 6-10 奥氏体化温度对 GCr15 钢 C 曲线的影响

(a) 843.3°C 奥氏体化, 晶粒度 9 级; (b) 1065.6°C 奥氏体化, 晶粒度 3 级

4) 原始组织的影响 在相同加热条件下, 钢的原始组织越细, 过冷奥氏体越稳定, C 曲线右移。图 6-11 是 35CrNi2Mo 钢在相同加热条件下测得的 C 曲线, 其中实线为铸态, 成分偏析, 晶粒粗大, C 曲线偏左; 虚线为轧态, 成分均匀, 晶粒较细, C 曲线靠右。

5) 外加应力和塑性变形的影响 三向压应力阻碍过冷奥氏体转变, 使 C 曲线右移。相反, 三向拉应力有利于过冷奥氏体转变, 使 C 曲线左移。

## 二、过冷奥氏体连续冷却转变

过冷奥氏体连续冷却转变图, 简称 CCT (Continuous Cooling Transformation, CCT) 图。



1. CCT 图的热处理工艺示意图(图 6-12)

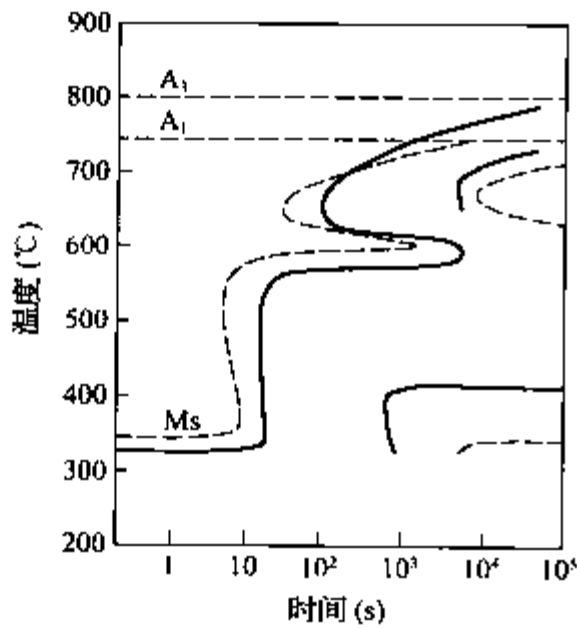


图 6-11 35CrNi2Mo 钢的原始组织对 C 曲线的影响  
----- 铸锭; —— 轧材

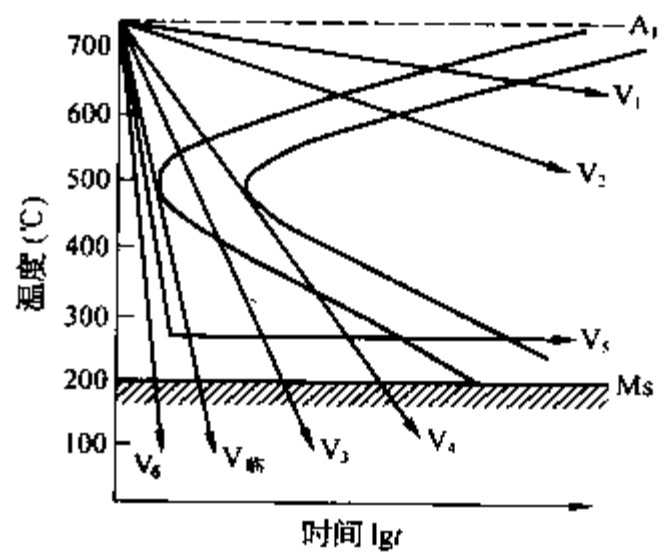


图 6-12 CCT 图热处理工艺示意图  
V<sub>1</sub>、V<sub>2</sub>—退火,正火; V<sub>3</sub>、V<sub>4</sub>—不完全淬火;  
V<sub>5</sub>—等温淬火; V<sub>6</sub>—淬火; V<sub>临</sub>—临界冷速(V<sub>C</sub>)

2. TTT 图和 CCT 图的比较

在相同的原始组织状态和加热条件下,CCT 图曲线位于 TTT 图曲线的右下方,也就是连续冷却转变中,过冷奥氏体的转变温度低于等温转变温度时的相应温度,连续冷却组织转变需要更长的孕育时间,见图 6-13。

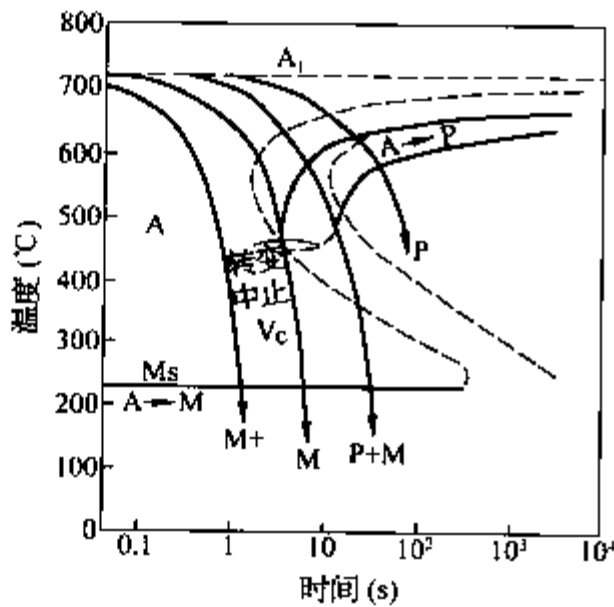


图 6-13 共析碳素钢的冷却曲线与奥氏体转变曲线的关系  
—— 连续冷却转变曲线; ---- 等温转变曲线;  
→ 淬火冷却曲线

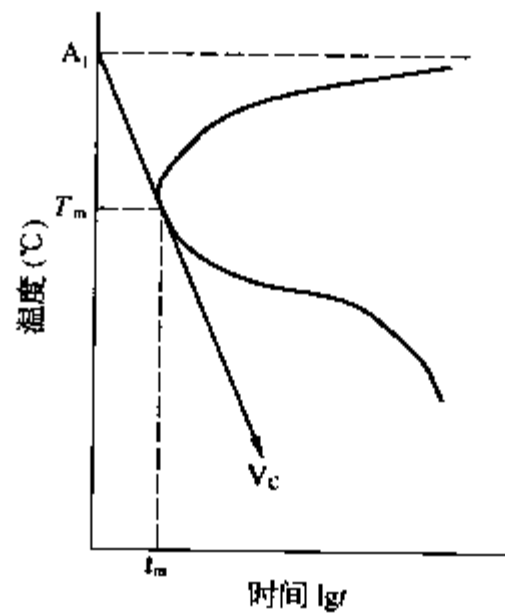


图 6-14 临界冷却速度转变开始曲线的关系

3. 钢的临界冷却速度

连续冷却时,过冷奥氏体转变发生突变的冷却速度,称临界冷却速度。

钢淬火得到马氏体的临界冷速称为马氏体临界冷却速度,也就是钢在淬火时为抑制非马氏体转变所需的最小冷却速度。临界冷却速度的近似计算见图 6-14,公式如下:

$$V_c = \frac{A_1 - T_m}{t_m} \quad (^\circ\text{C}/\text{s})$$

- 式中 A<sub>1</sub>——临界温度(平衡时)(°C);
- T<sub>m</sub>——等温转变曲线与切线相切处的温度(°C);
- t<sub>m</sub>——奥氏体最小稳定化的时间(s)。

## 三、钢的过冷奥氏体冷却曲线(表 6-2)

表 6-2 TTT 和 CCT 图明细表

图号	钢牌号	化学成分(质量分数,%)										奥氏体化温度(°C)	马氏体转变温度(°C)			
		$\omega_C$	$\omega_{Si}$	$\omega_{Mn}$	$\omega_{Cr}$	$\omega_{Ni}$	$\omega_{Mo}$	$\omega_{W}$	$\omega_V$	$\omega_{Ti}$	其他					
碳钢, 低合金钢																
图 6-15	35	0.35		0.37										840	Ms 350	
图 6-16	45	0.46	0.19	0.8	0.31									850	Ms 345	
图 6-17	65	0.64	0.22	0.68												
渗碳钢																
图 6-18	20CrMnTi	0.18	0.28	0.98	1.18								0.17	$\omega_{Cu}$ 0.09	880	Ms 374
图 6-19	20CrMnTi(渗碳)	1.02	0.34	0.96	1.26								0.12		780	Ms 185
图 6-20	20CrMo	0.18	0.21	0.62	0.81			0.27							875	Ms 380
图 6-21	20CrMo(渗碳)	1.08	0.21	0.62	0.81			0.27							875	Ms 100
图 6-22	20Cr2Ni4	0.18			1.68	3.73									900	Ms 330
图 6-23	20Cr2Ni4(渗碳)	1.08			1.68	3.73									900	Ms 120
图 6-24	18Cr2Ni4W	0.16	0.19		1.51	4.3			0.86						900	Ms 310
图 6-25	18Cr2Ni4W(渗碳)		0.19		1.51	4.3			0.86						900	Ms 78
调质钢																
图 6-26	40Cr	0.38	0.26	0.74	0.90	0.26	0.04							$\omega_{Cu}$ 0.17	850	Ms 325
图 6-27	30CrMnSi	0.29	1.05	0.98	0.91	0.13									900	Ms 320
图 6-28	40CrMnMo	0.37	0.15	0.77	0.98	0.04	0.21								1 095~845	Ms 340
图 6-29	35CrMo	0.35			1.15		0.25								870	Ms 330
图 6-30	42CrMo	0.41	0.29	0.67	1.01	0.23									860	Ms 320
图 6-31	38CrMoAlA	0.38	0.42	0.42	1.38	0.23							$\omega_{Al}$ 0.82		930	Ms 380
图 6-32	40CrNiMo	0.40	0.38	0.69	0.94	1.95	0.29								845	Ms 275

(续表)

图号	钢牌号	化学成分(质量分数,%)										奥氏体化温度(℃)	马氏体转变温度(℃)		
		ωC	ωSi	ωMn	ωCr	ωNi	ωMo	ωW	ωV	ωTi	其他				
<b>弹 簧 钢</b>															
图 6-33	65Mn	0.64	0.18	0.92									ω <sub>Cu</sub> 0.16	830	Ms 254
图 6-34	50CrV	0.53		0.67	0.93				0.18					840	Ms 270
图 6-35	60Si2Mn	0.62	2.0	0.95	0.15									870	Ms 250
<b>轴 承 钢</b>															
图 6-36	GCr15	1.03	0.28	0.25	1.47	0.04	<0.02						ω <sub>Cu</sub> 0.05	850	Ms 202
图 6-37	GCr15SiMn	0.93	0.55	1.01	1.33									825	Ms 205
<b>工 具 钢, 不 锈 钢</b>															
图 6-38	T8	0.76	0.22	0.29	0.11	0.07	0.02		0.02					810	Ms 245
图 6-39	T10	1.03	0.17	0.22	0.07	0.10	0.01						ω <sub>Cu</sub> 0.14	790	Ms 175
图 6-40	9SiCr	0.85~ 0.95	1.2~ 1.6	0.3~ 0.6	0.95~ 1.25									820~860	Ms 160
图 6-41	CrWMn	1.03	0.28	0.97	1.05	0.13		1.15						815	Ms 245
图 6-42	Cr12	2.08	0.28	0.39	11.48	0.31	0.02		0.04				ω <sub>Cu</sub> 0.05	970	Ms 184
图 6-43	Cr12MoV	1.56			12.46	0.26	0.54	0.28	0.65					1 000	Ms 180
图 6-44	5CrMnMo	0.59	0.41	1.42	0.85	0.10	0.16							850	Ms 220
图 6-45	5CrNiMo	0.55	0.30	0.77	0.87	1.18	0.23							880	Ms 230
图 6-46	3Cr2W8V	0.3	0.35	0.40	2.70			9.0	0.35					1 100	Ms 380
图 6-47	4Cr5MoV1Si(H13)	0.4	1.05		5.0	1.35			1.10					1 850°F (1 010℃)	Ms 635°F (335℃)
图 6-48	65Nb (65Cr4W3Mo2VNb)													1 160	Ms 220

(续表)

图号	钢牌号	化学成分(质量分数,%)										奥氏体化温度(°C)	马氏体转变温度(°C)		
		$\omega_C$	$\omega_{Si}$	$\omega_{Mn}$	$\omega_{Cr}$	$\omega_{Ni}$	$\omega_{Mo}$	$\omega_W$	$\omega_V$	$\omega_{Ti}$	其他				
工具钢, 不锈钢															
图 6-49	012Al (5Cr4Mo3SiMnVAl)	0.54	0.79	0.85	4.18		3.09		1.14				$\omega_{Al}$ 0.40	1 100	Ms 277
图 6-50	CG-2 (6Cr4Mo3Ni2WV)	0.56	0.2	0.3	4.04	2.16	3.02	1.20	1.06					1 120	Ms 180
图 6-51	GM 钢 (9Cr6W3Mo2V2)	0.86~ 0.94			5.6~ 6.4		2~2.5	2.8~ 3.2	1.7~ 2.2					1 120	Ms 220
图 6-52	HMB3(3Cr3Mo3VNB)	0.25	0.47	0.29	3.05	<0.2	2.81		0.69			$\omega_{Nb}$ 0.14	1 060	Ms 390	
图 6-53	W18Cr4V	0.81	0.15		3.77		0.44	18.25	1.07				1 290	Ms 140	
图 6-54	W6Mo5Cr4V2	0.80			4.15		4.94	6.64	1.89				1 225	Ms 180	
图 6-55	12Cr13	0.11	0.31	0.62	13.24	0.15	0.02						980	Ms 330	
图 6-56	40Cr13	0.44	0.30	0.20	13.12	0.31							980	Ms 260	
图 6-57	Mn13	1.18	0.26	12.26									1 050		
碳钢, 低合金钢															
图 6-58	45	0.44	0.22	0.66	0.15				0.02					880	Ms 350
渗碳钢															
图 6-59	20CrMo	0.22	0.25	0.64	0.97		0.23							875	Ms 400
图 6-60	20Cr2Ni4A	0.17	0.31	0.51	1.57	3.45								880	Ms 380
调质钢															
图 6-61	40Cr	0.43	0.25	0.67	0.89									850	Ms 330
图 6-62	35CrMo	0.38	0.23	0.64	0.99	0.08	0.16							860	Ms 370

(续表)

图号	牌号号	化学成分(质量分数,%)										奥氏体化温度(°C)	马氏体转变温度(°C)	
		$\omega_C$	$\omega_{Si}$	$\omega_{Mn}$	$\omega_{Cr}$	$\omega_{Ni}$	$\omega_{Mo}$	$\omega_W$	$\omega_V$	$\omega_{Ti}$	其他			
调 质 钢														
图 6-63	42CrMo	0.46	0.22	0.50	1.00	0.26	0.21						850	Ms 280
图 6-64	38CrMoAlA	0.38	0.42	0.46	1.38		0.23				$\omega_{Al} 0.82$		930	Ms 380
图 6-65	40CrNiMo	0.41	0.31	0.80	0.87	1.82	0.29						850	Ms 275
弹 簧 钢														
图 6-66	60Si2Mn	0.62	1.76	0.75									870	Ms 285
轴 承 钢														
图 6-67	GCr15	1.04	0.26	0.33	1.53	0.31	0.01		0.01				860	Ms 245
图 6-68	GCr15SiMn	0.99	0.55	1.0	1.45								850	Ms 200
工 具 钢, 不 锈 钢														
图 6-69	T8	0.76	0.22	0.29	0.11	0.07	0.02		0.02		$\omega_{Cu} 0.11$		810	Ms 245
图 6-70	T10	1.03	0.17	0.22	0.07	0.10	0.01				$\omega_{Cu} 0.14$		860	Ms 160
图 6-71	Cr12	2.08	0.28	0.39	11.48	0.31	0.02						1 050	Ms 80
图 6-72	5CrMnMo	0.53	0.38	1.53	0.76	0.30	0.17						900	Ms 250
图 6-73	5CrNiMo	0.52	0.29		1.09	1.72	0.43		0.14				850	Ms 260
图 6-74	4Cr5MoV1Si(H13)												1 030	Ms 260
图 6-75	3Cr2W8V	0.28	0.10	0.36	2.57	0.04	0.03	8.88	0.36				1 120	Ms 420
图 6-76	40Cr13	0.44	0.30	0.20	13.12	0.31	0.01		0.02		$\omega_{Cu} 0.09$		980	Ms 270
图 6-77	Mn13	1.29		13.3	0.08								1 050	

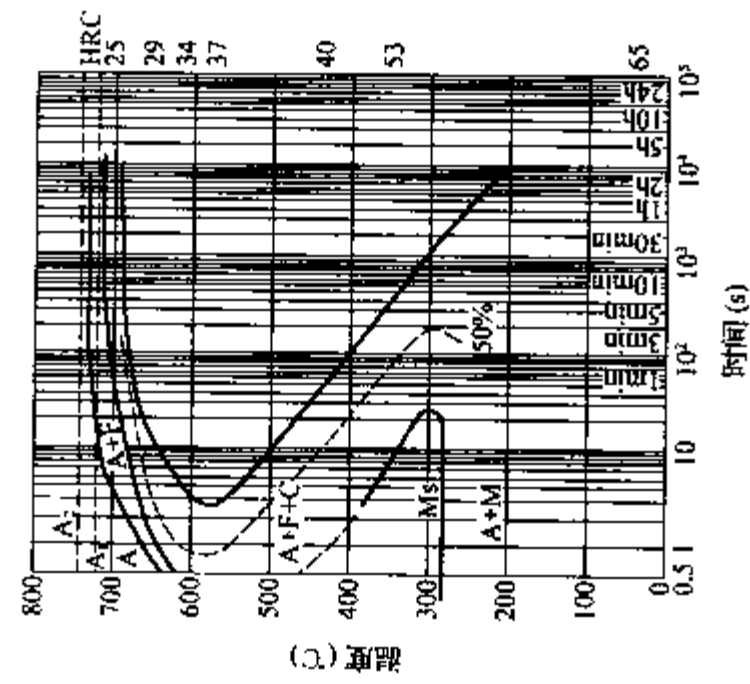


图 6-17 65 钢

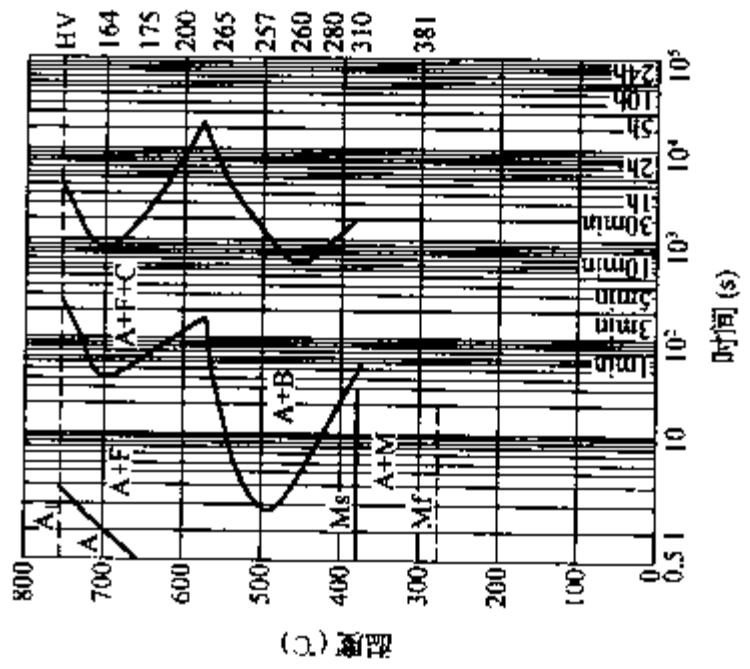


图 6-20 20CrMo 钢

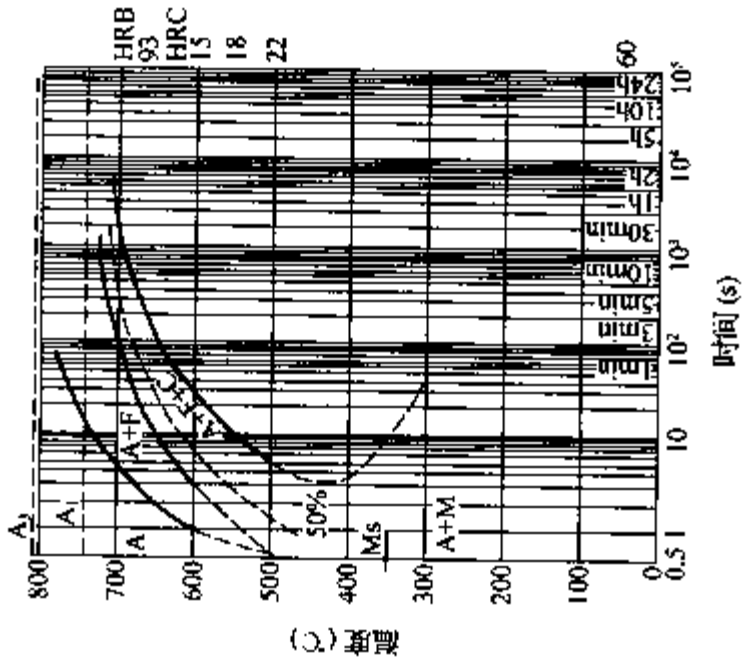


图 6-16 45 钢

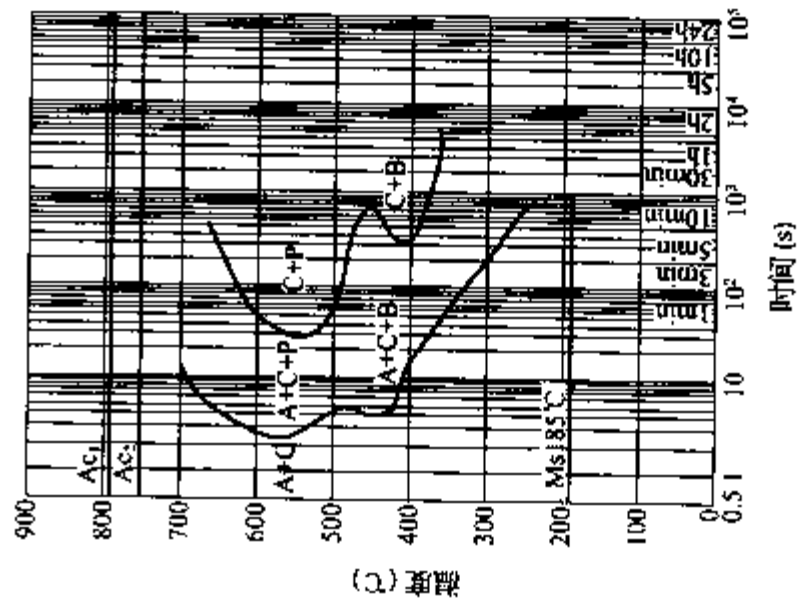


图 6-19 20CrMnTi 钢 (渗碳后)

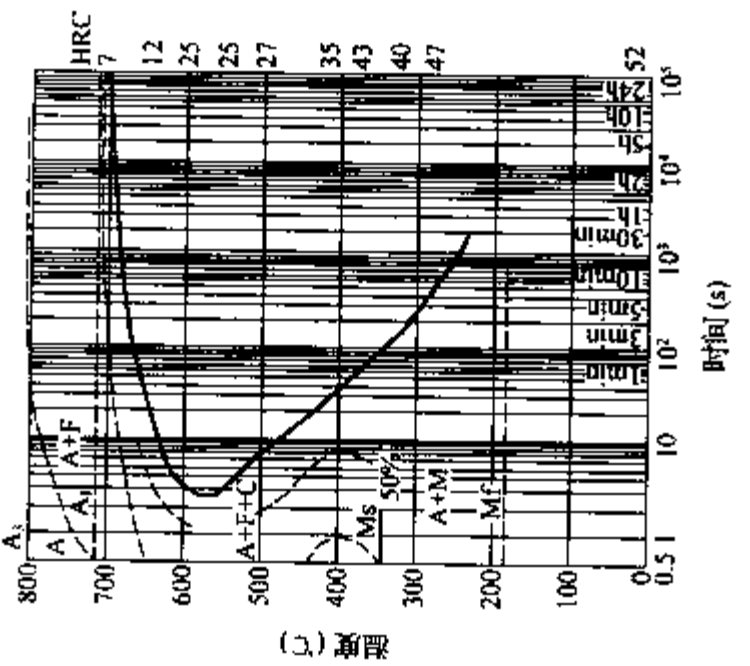


图 6-15 35 钢

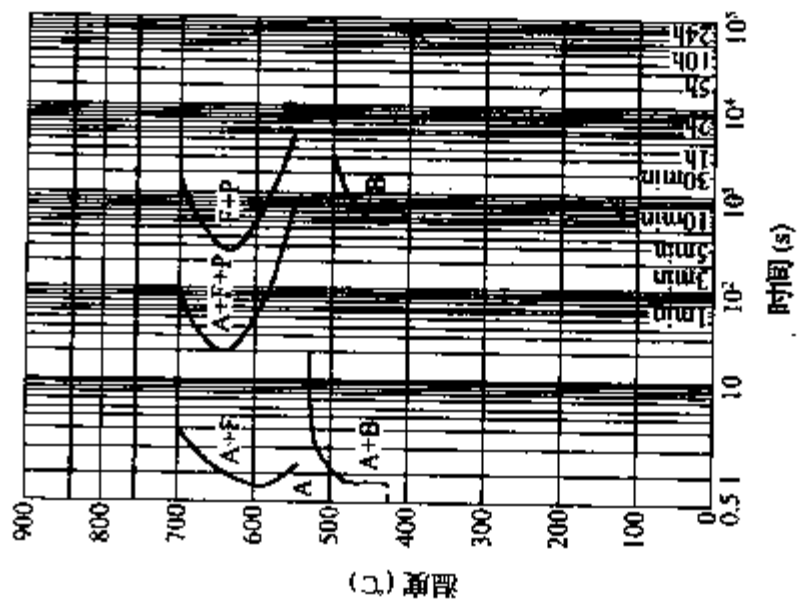


图 6-18 20CrMnTi 钢

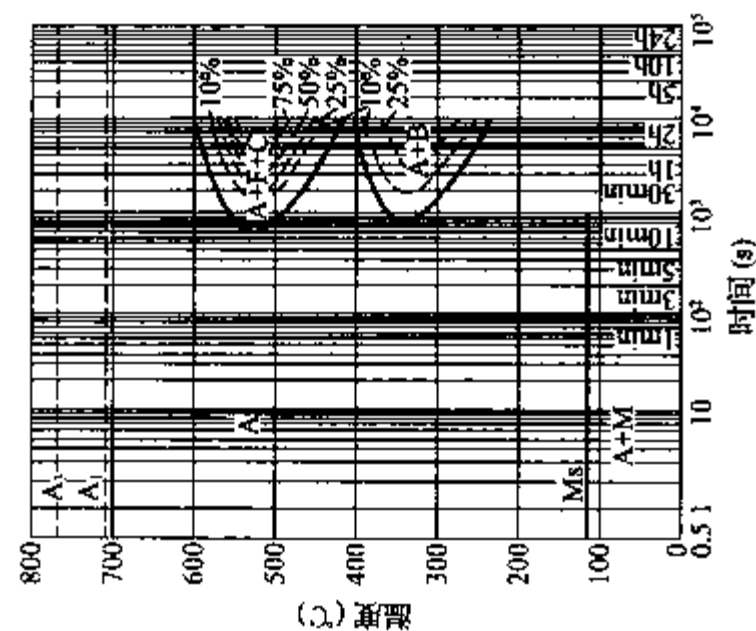


图 6-23 20Cr2Ni4 钢(渗碳后)

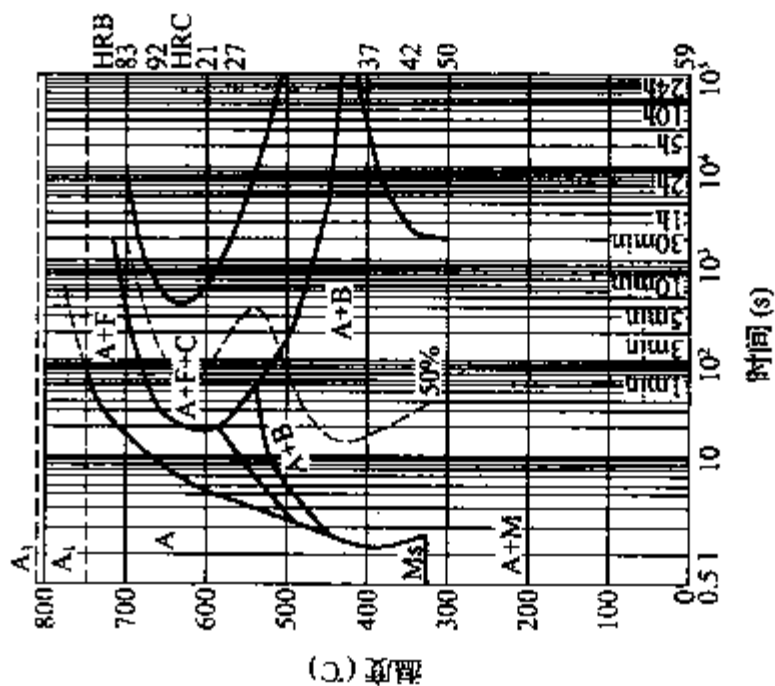


图 6-26 40Cr 钢

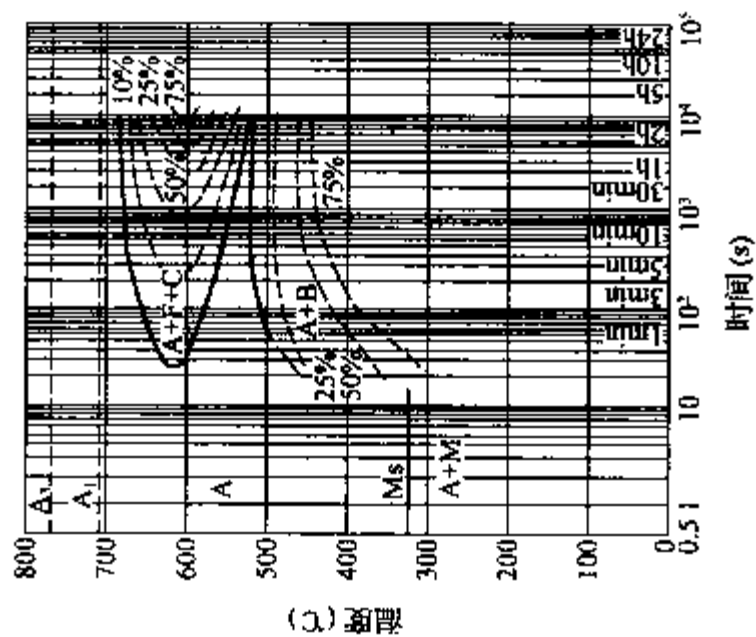


图 6-22 20Cr2Ni4 钢

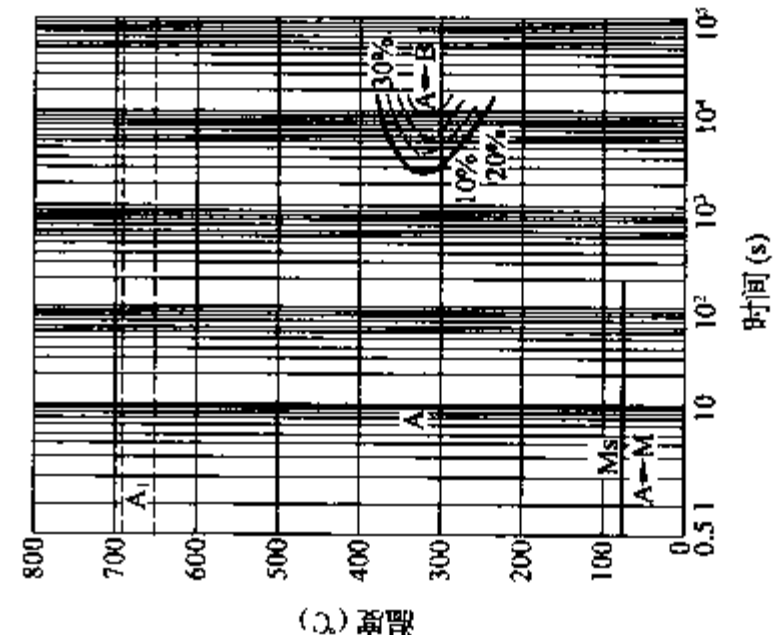


图 6-25 18Cr2Ni4W 钢(渗碳后)

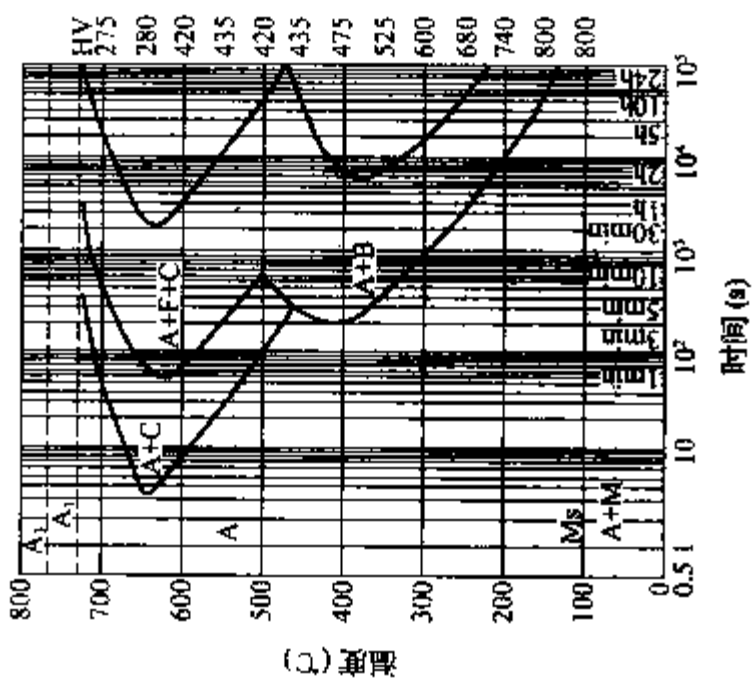


图 6-21 20CrMo 钢(渗碳后)

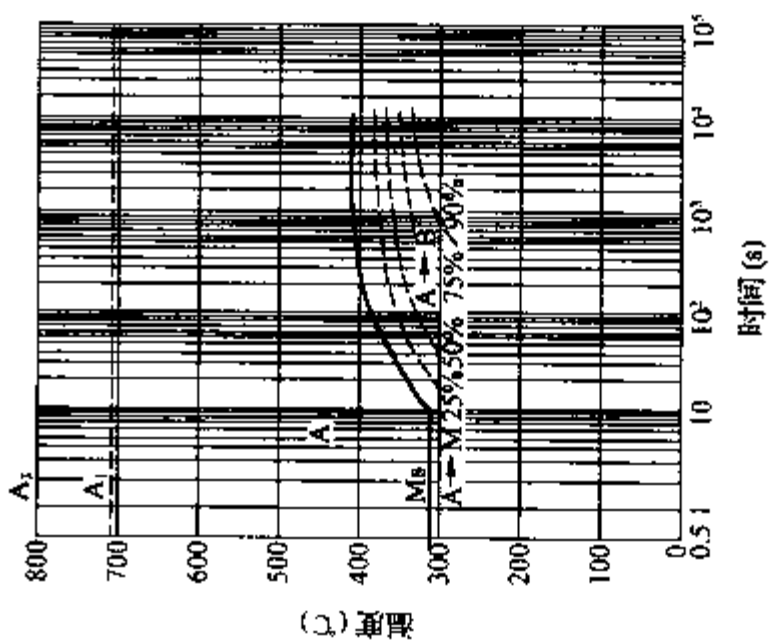


图 6-24 18Cr2Ni4W 钢

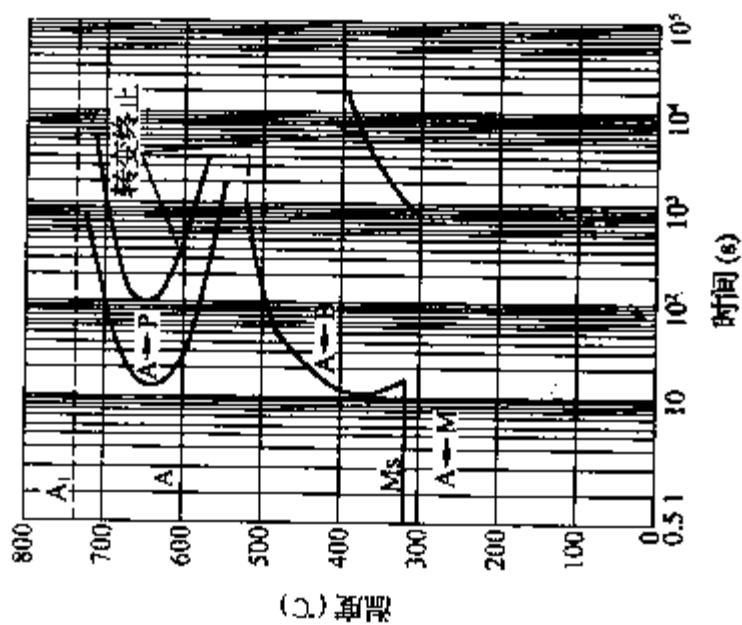


图 6-27 30CrMnSi 钢

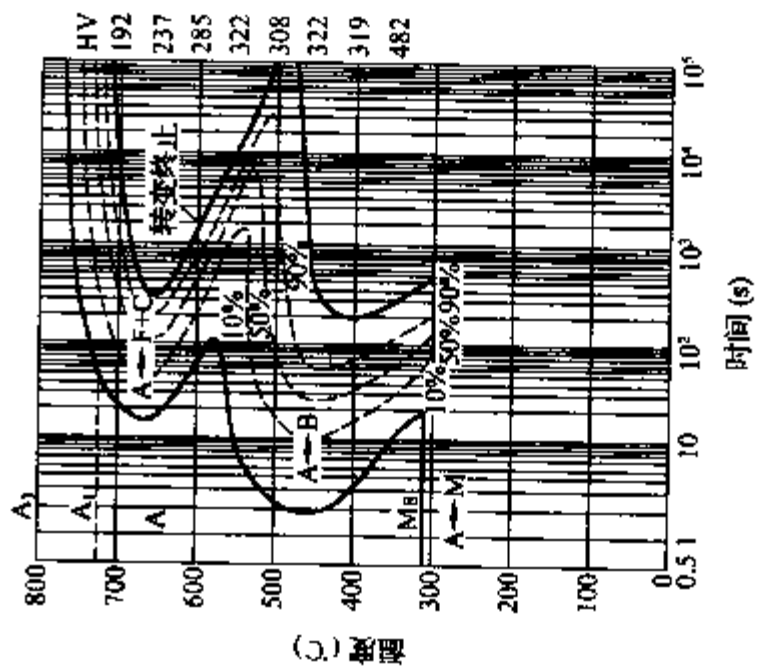


图 6-30 42CrMo 钢

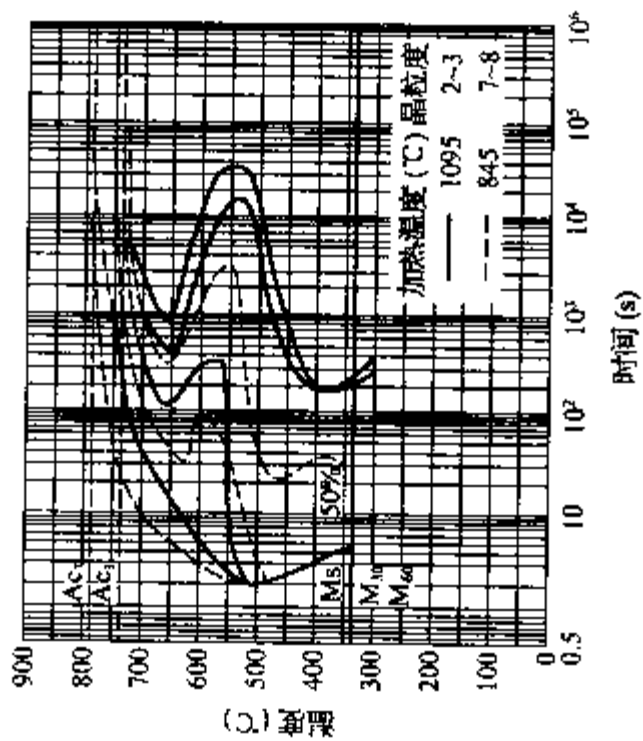


图 6-28 40CrMnMo 钢

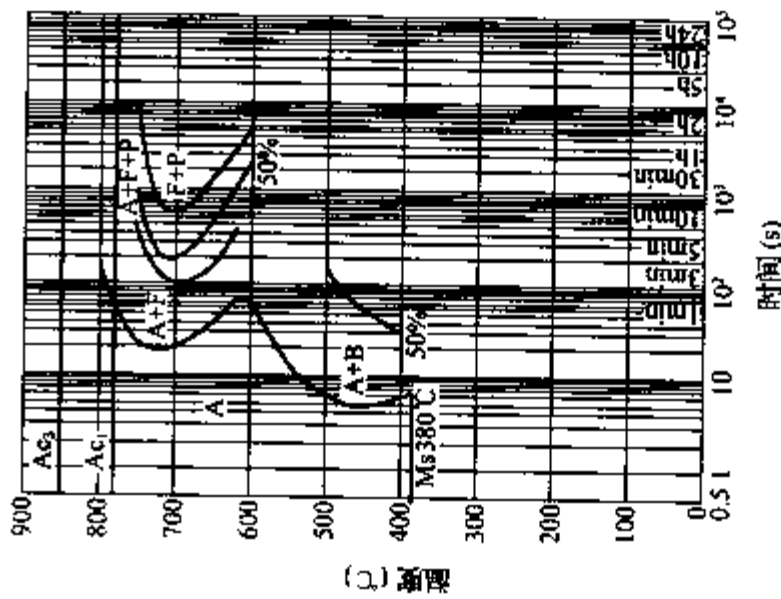


图 6-31 38CrMoAlA 钢

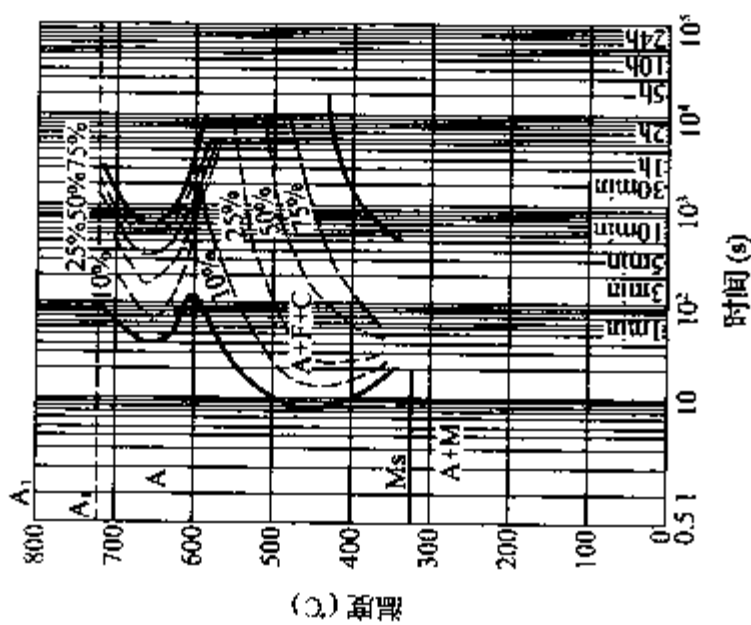


图 6-29 35CrMo 钢

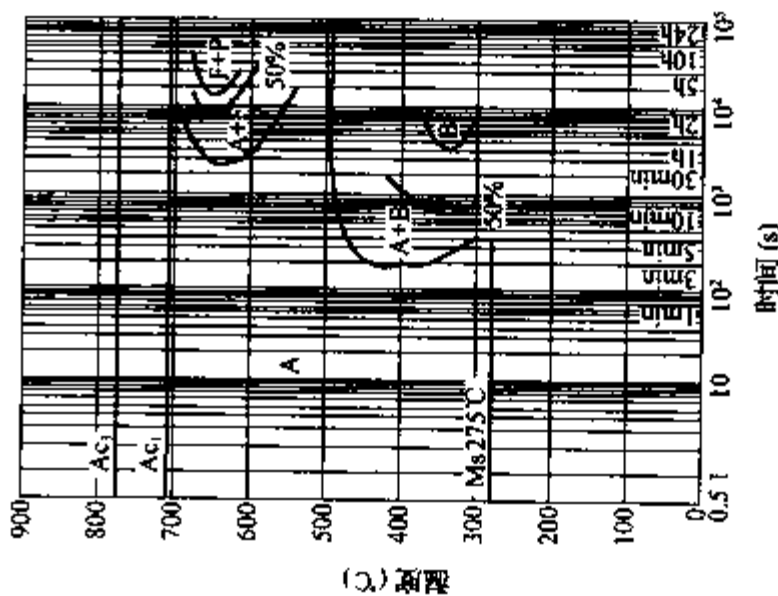


图 6-32 40CrNiMo 钢



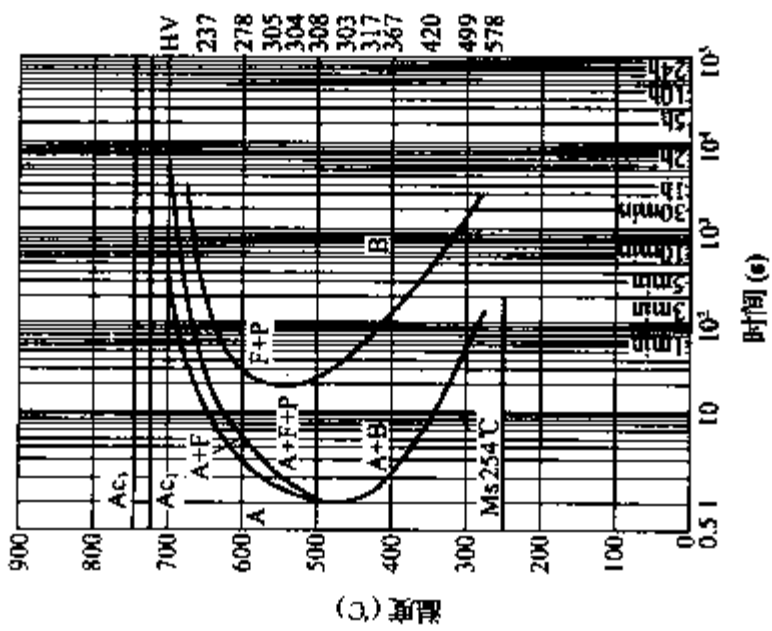


图 6-33 65Mn 钢

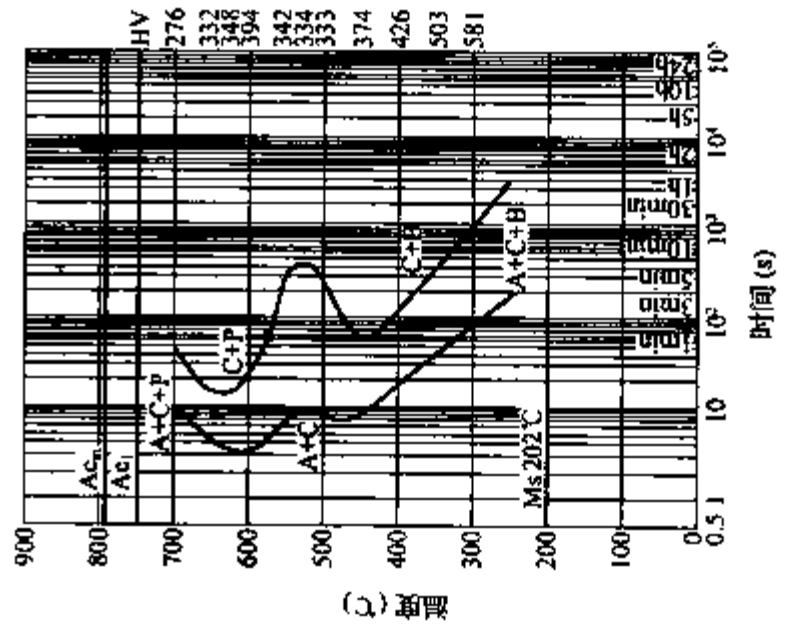


图 6-36 GCr15 钢

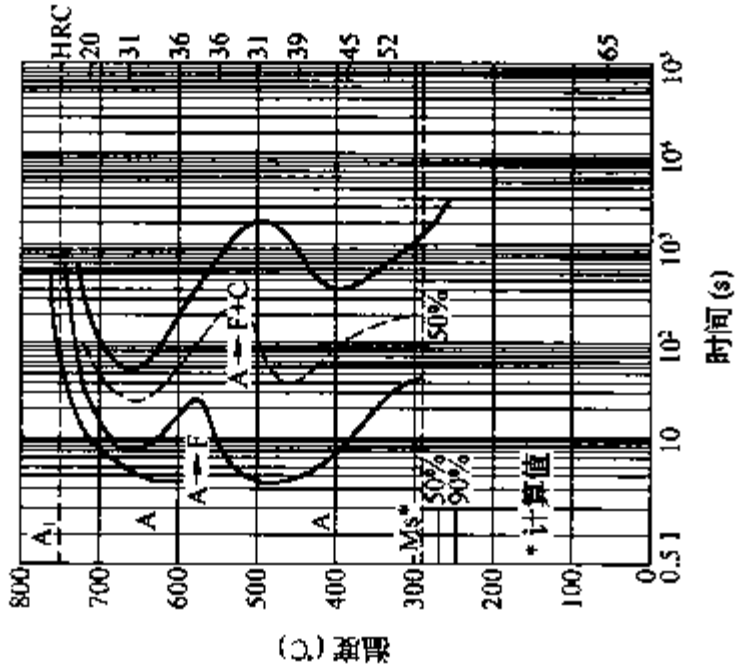


图 6-34 50CrV 钢

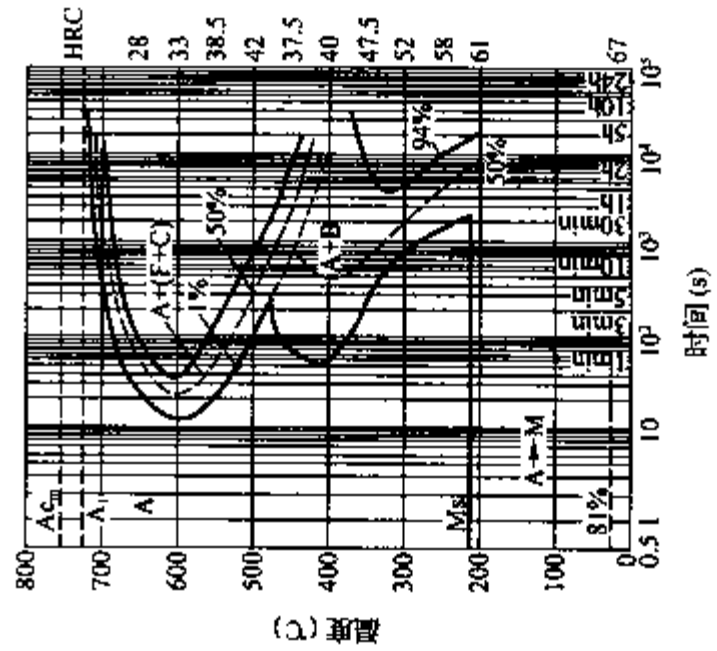


图 6-37 GCr15SiMn 钢

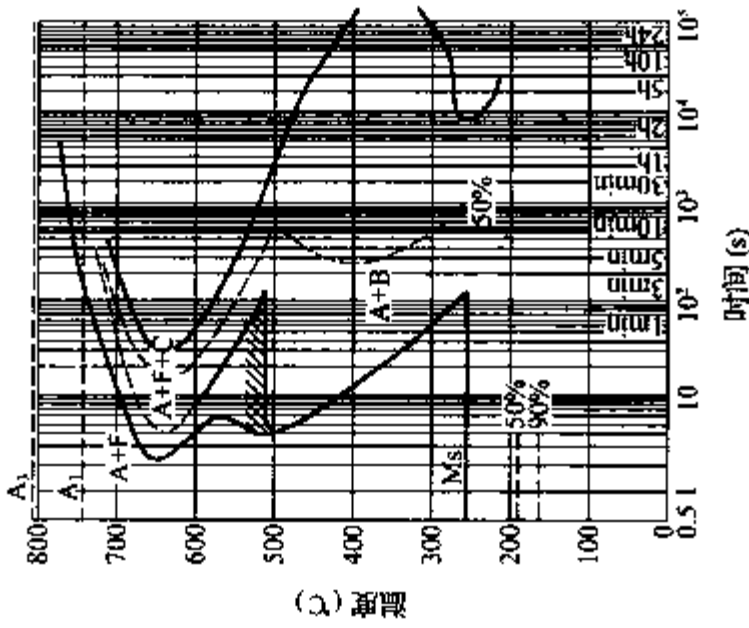


图 6-35 60Si2Mn 钢

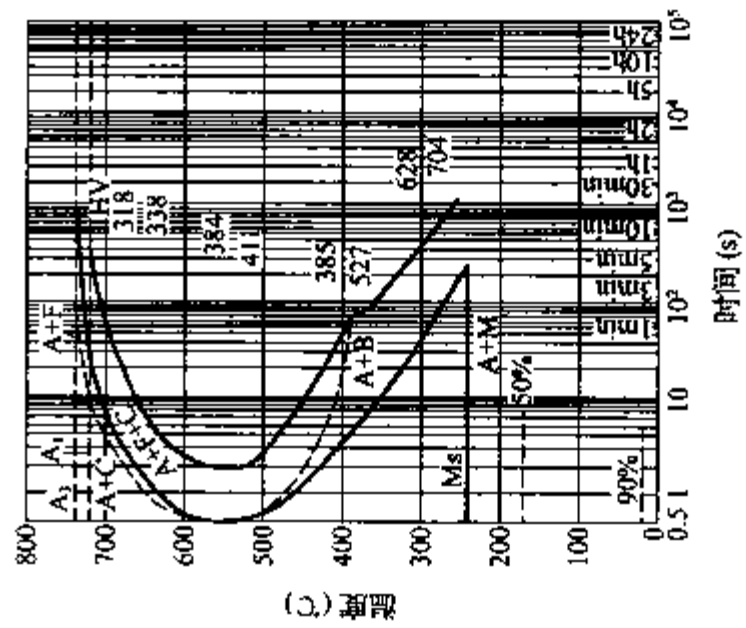


图 6-38 T8 钢

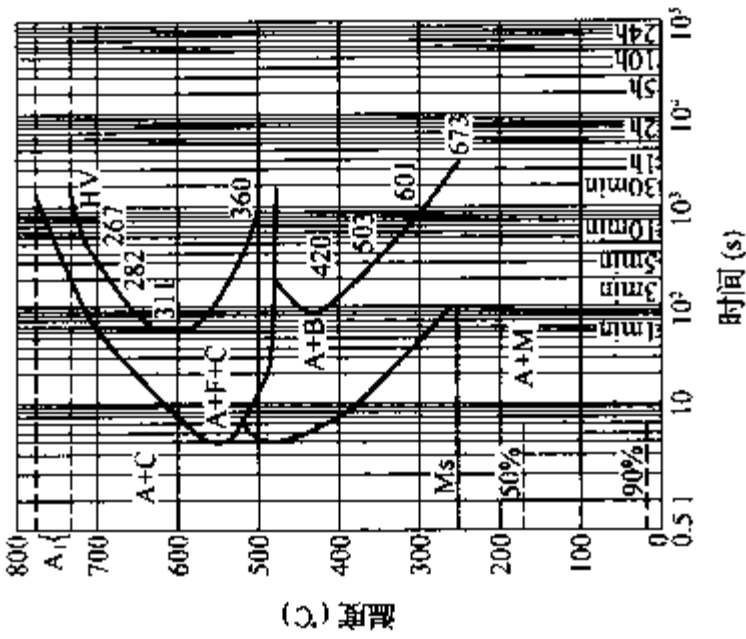


图 6-41 Cr-W-Mn 钢

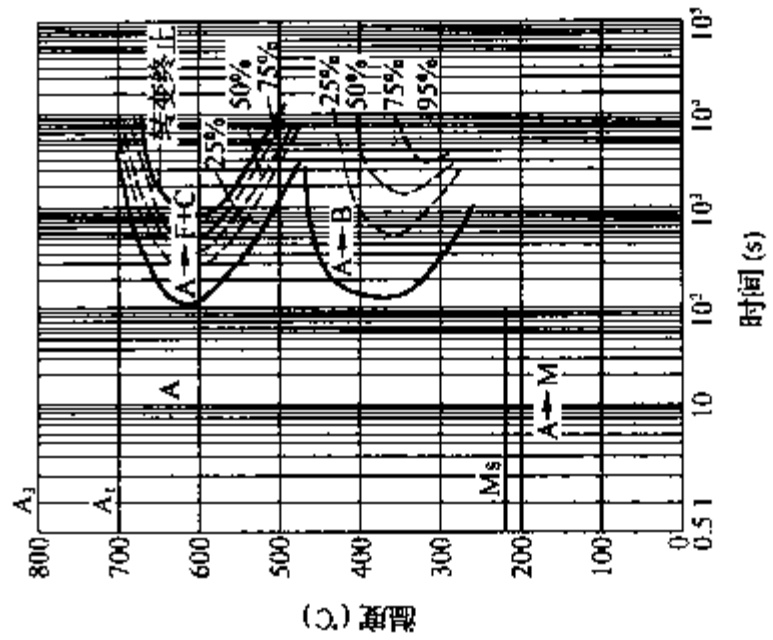


图 6-44 5CrMnMo 钢

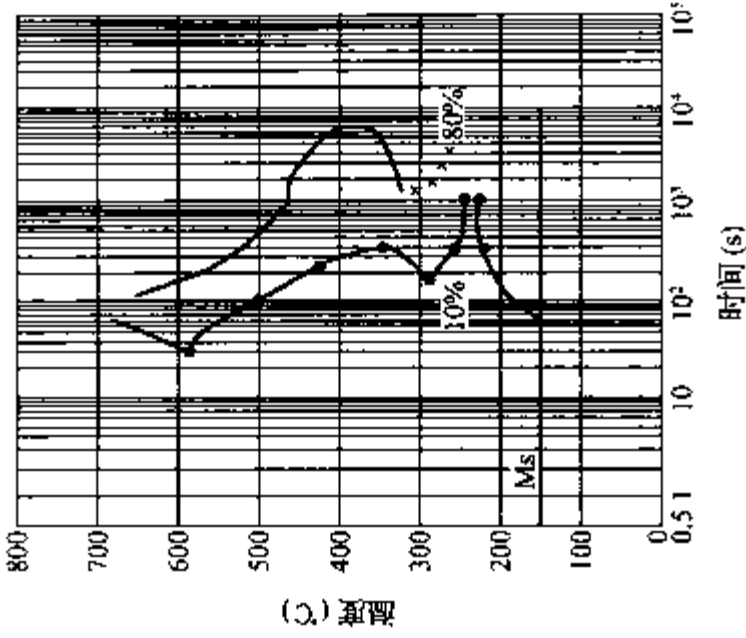


图 6-40 9SiCr 钢

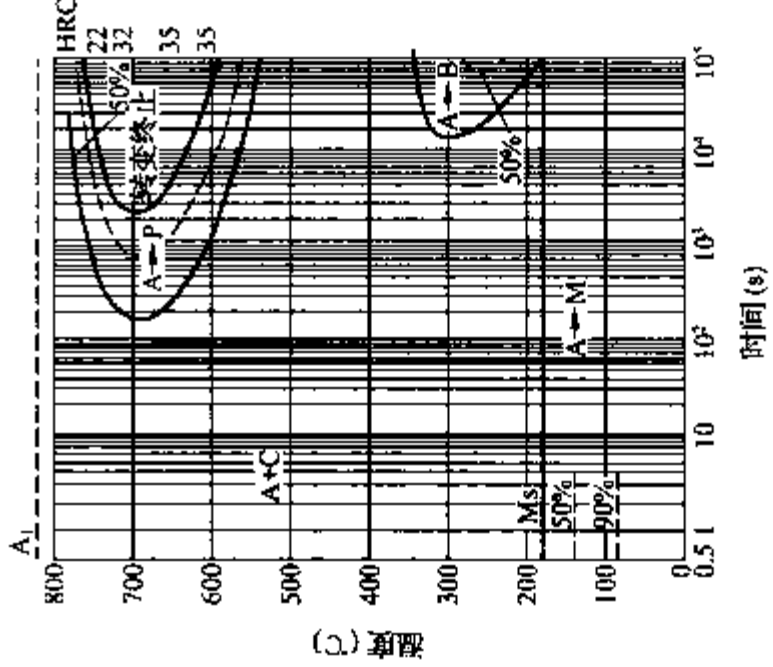


图 6-43 Cr12MoV 钢

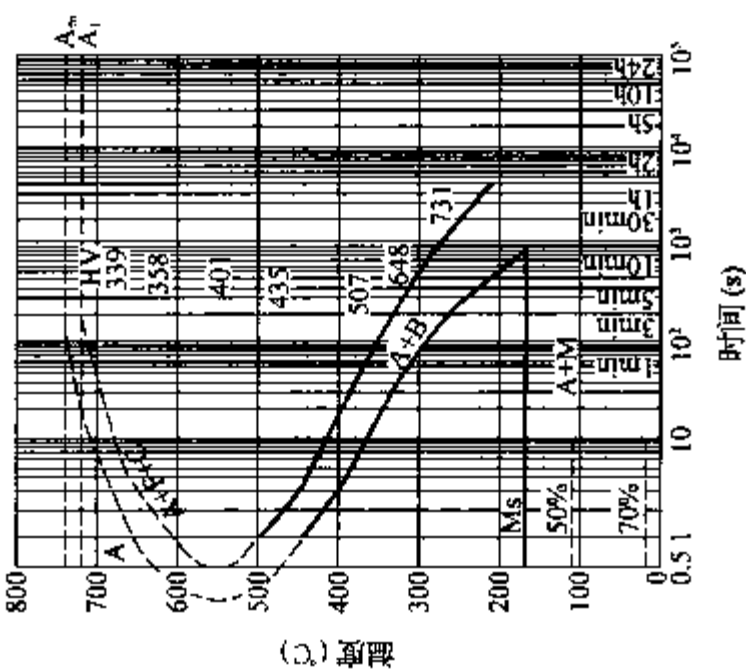


图 6-39 T10 钢

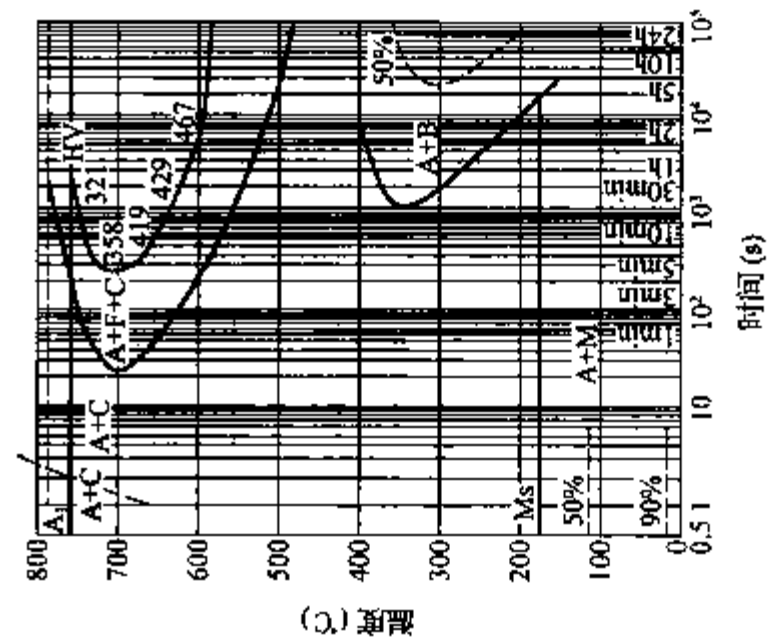


图 6-42 Cr12 钢

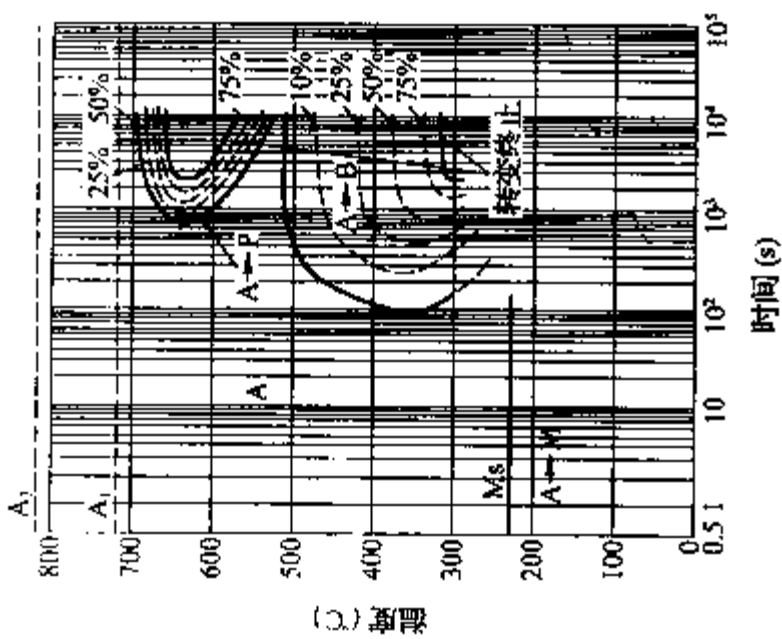


图 6-45 5CrNiMo 钢

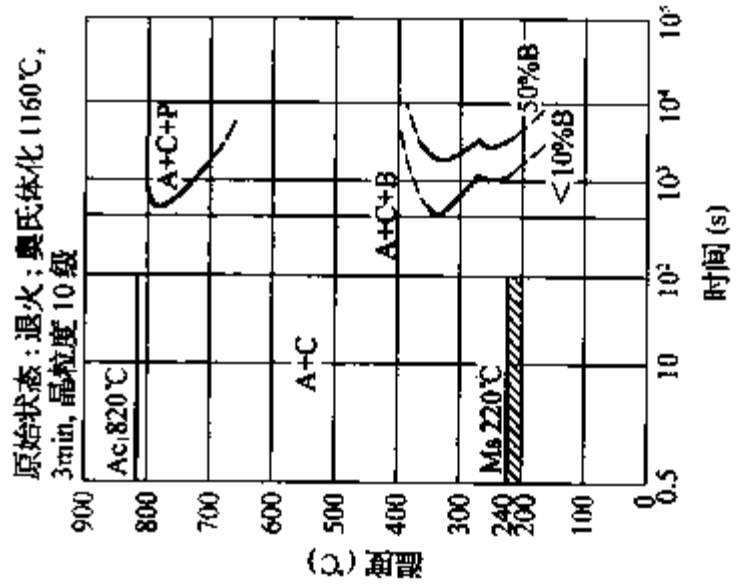


图 6-48 65Nb 钢

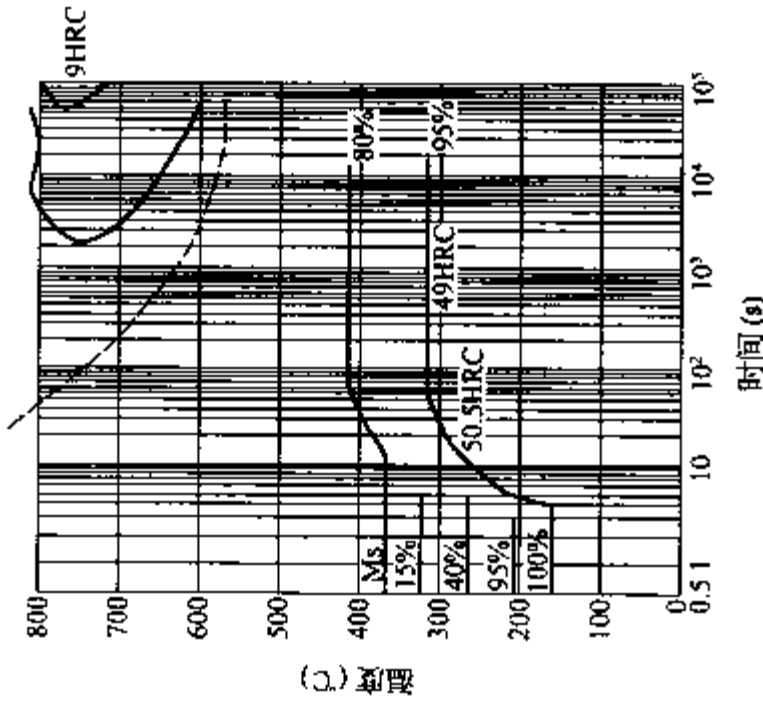


图 6-46 3Cr2W8V 钢

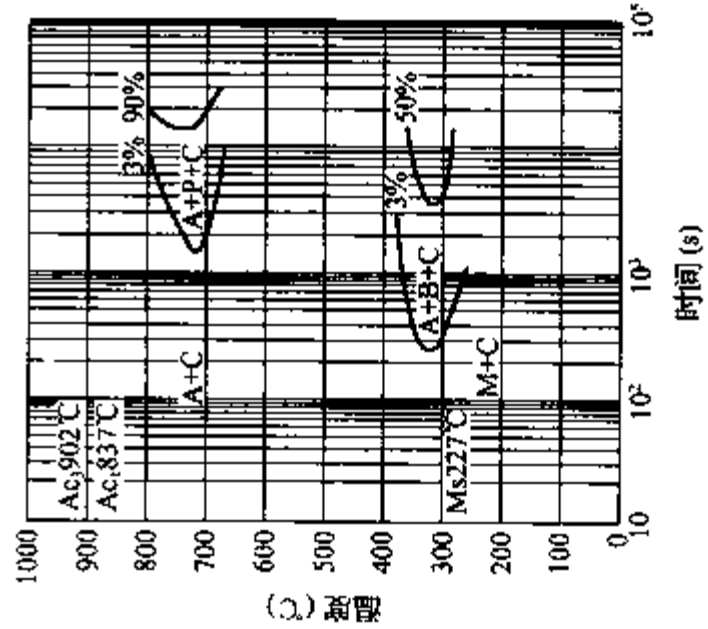


图 6-49 012Al 钢

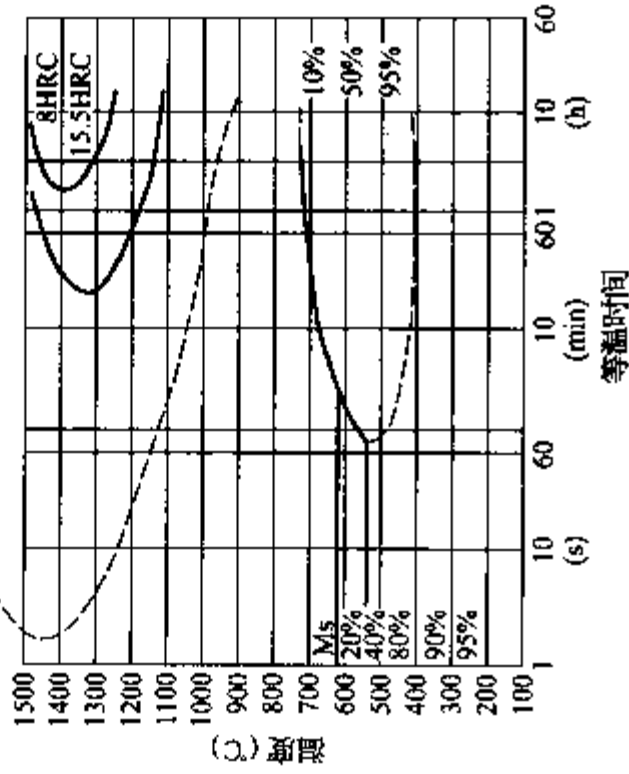


图 6-47 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢

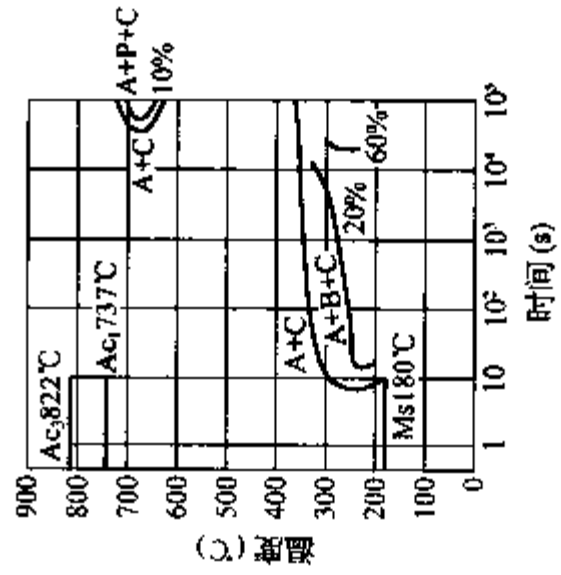


图 6-50 CG-2 钢

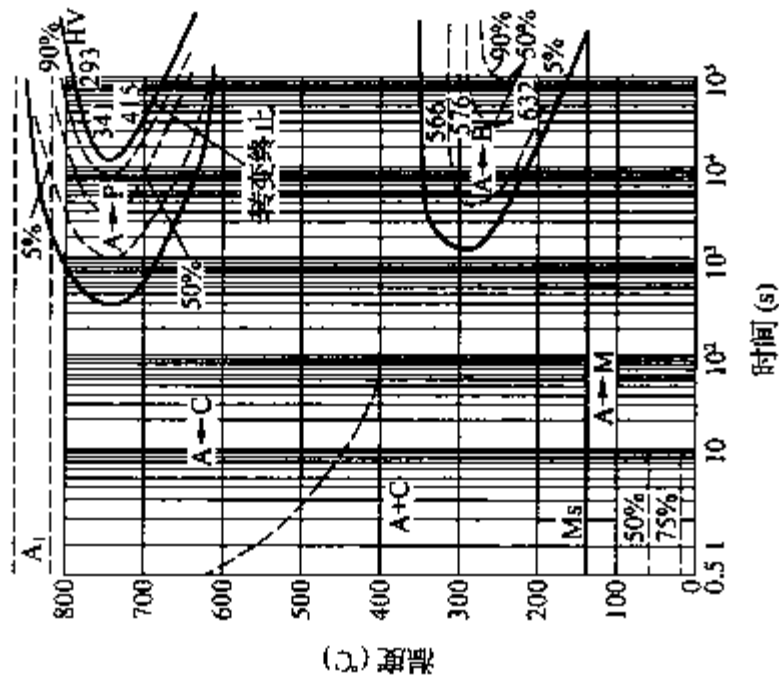


图 6-53 W18Cr4V 钢

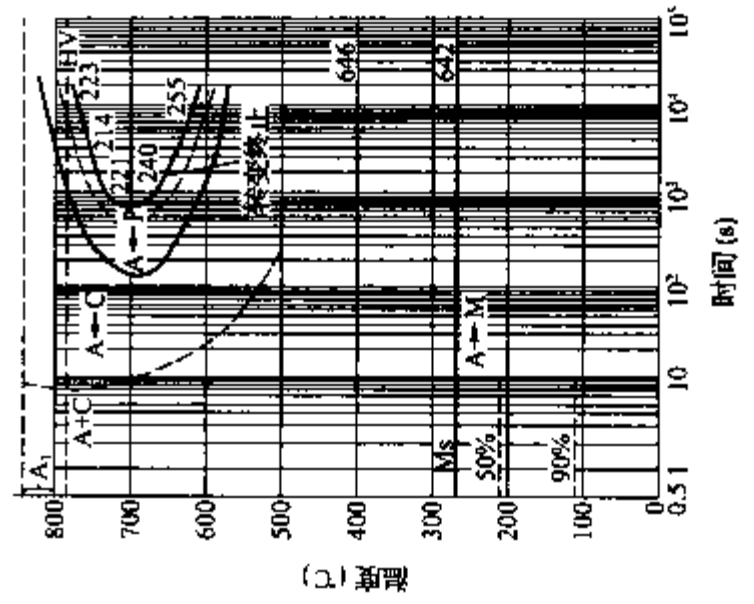


图 6-54 W6Mo5Cr4V2 钢

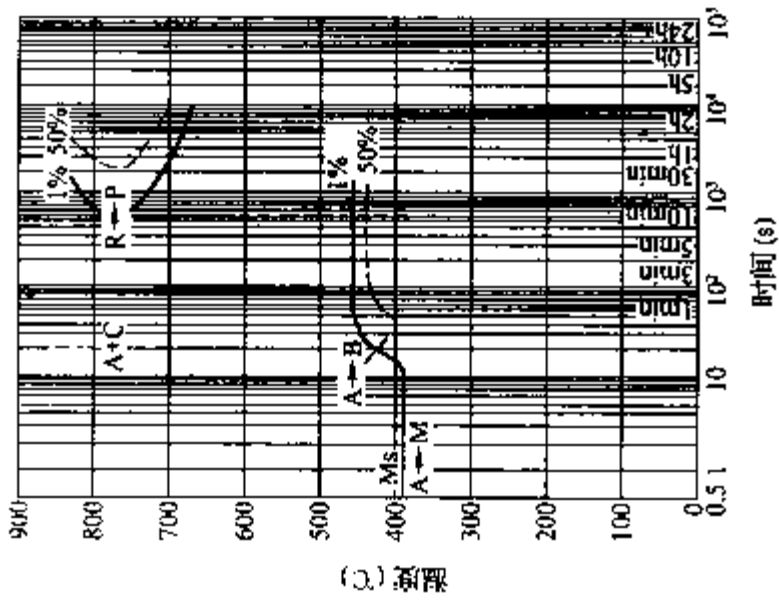


图 6-51 GM 钢

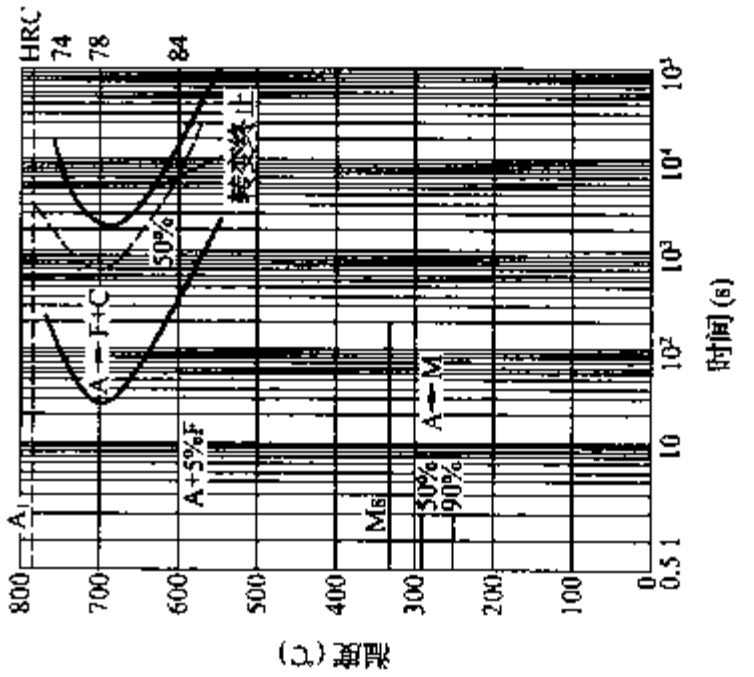


图 6-52 H13 钢

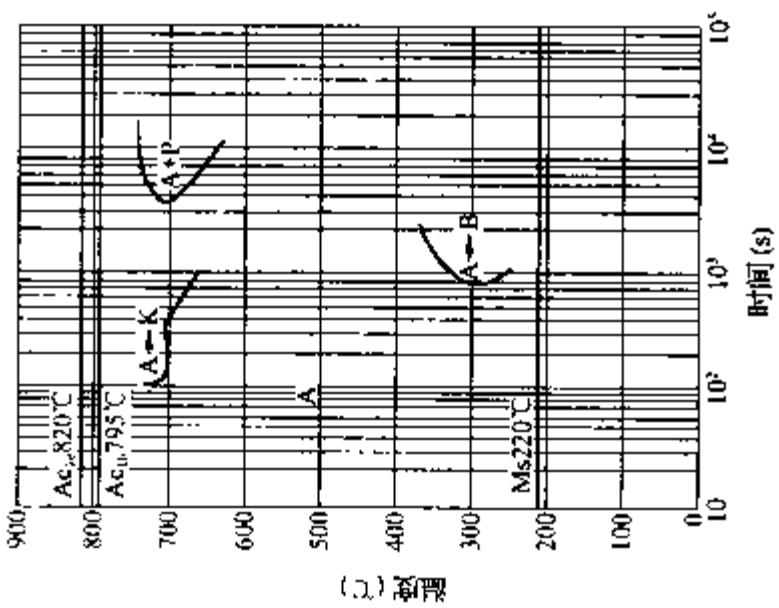


图 6-55 12Cr13 钢

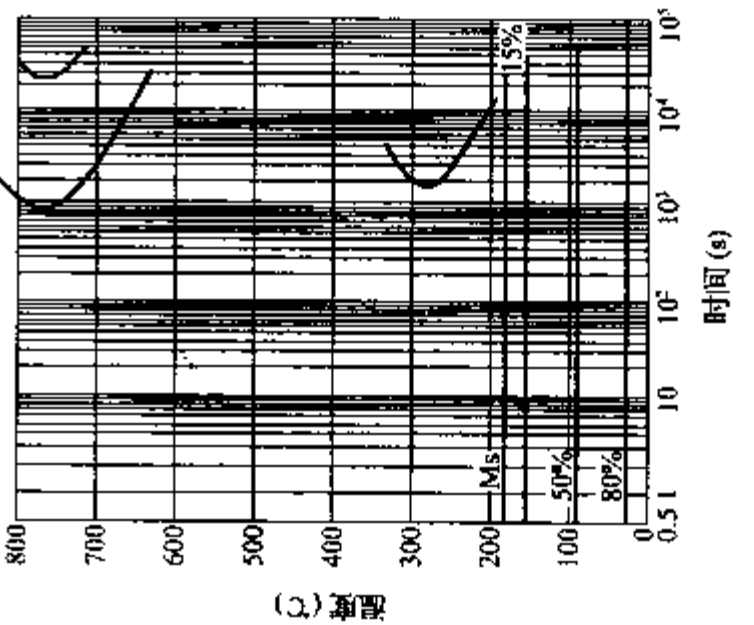


图 6-56 40Cr13 钢

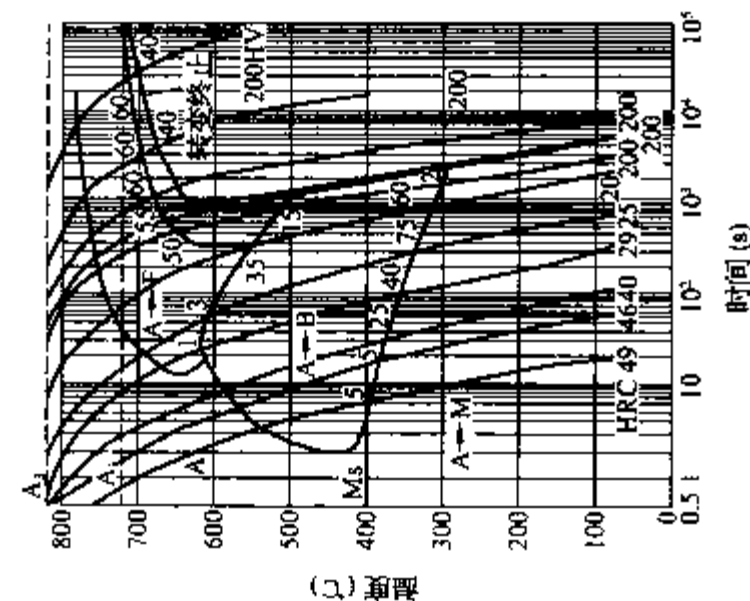


图 6-59 20CrMo 钢

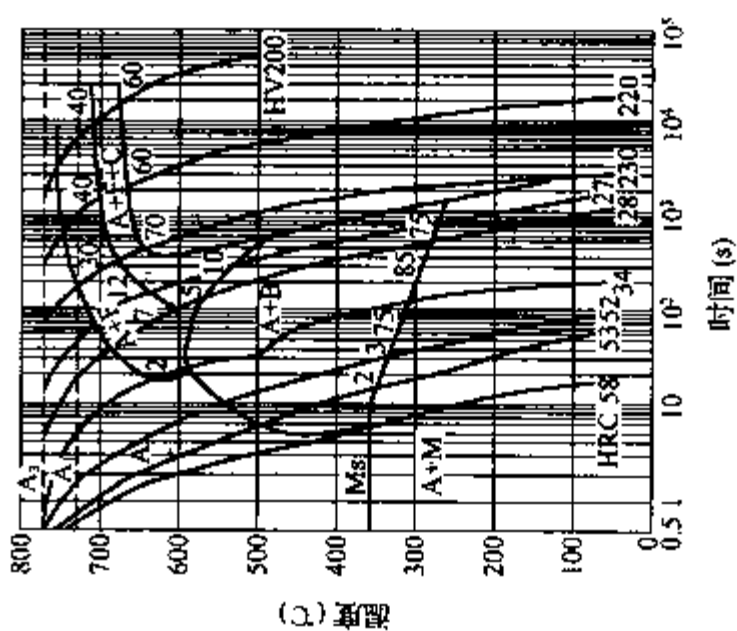


图 6-62 35CrMo 钢

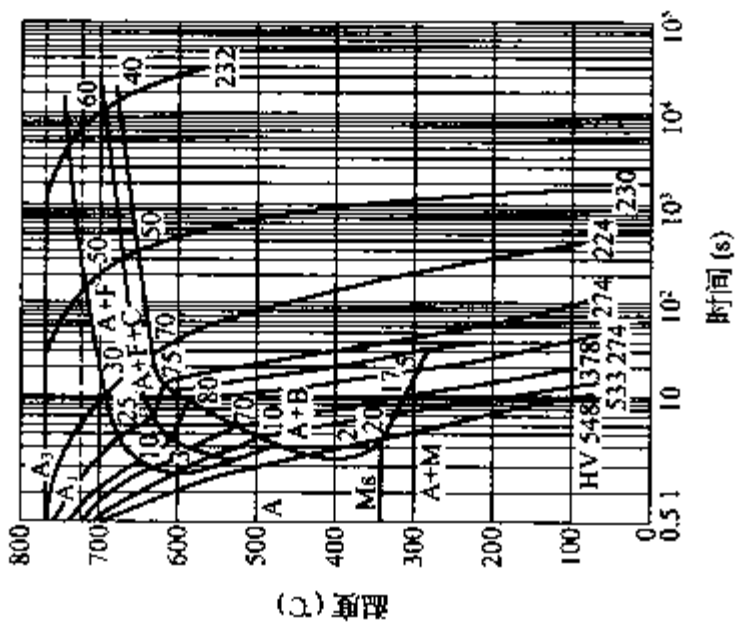


图 6-58 45 钢

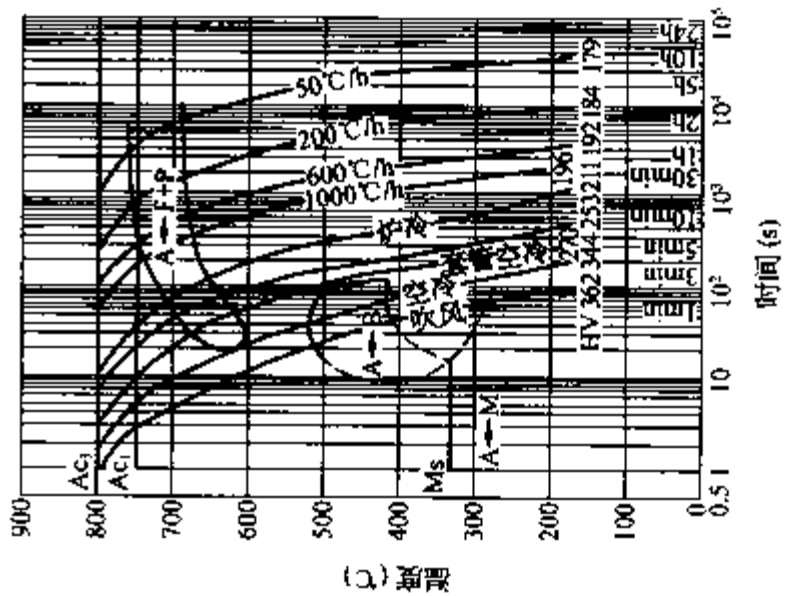


图 6-61 40Cr 钢

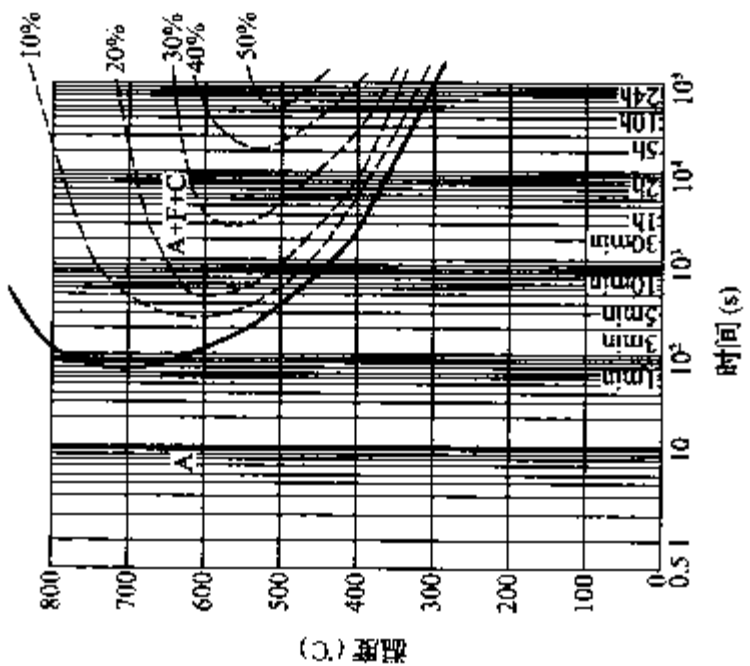


图 6-57 Mn13 钢

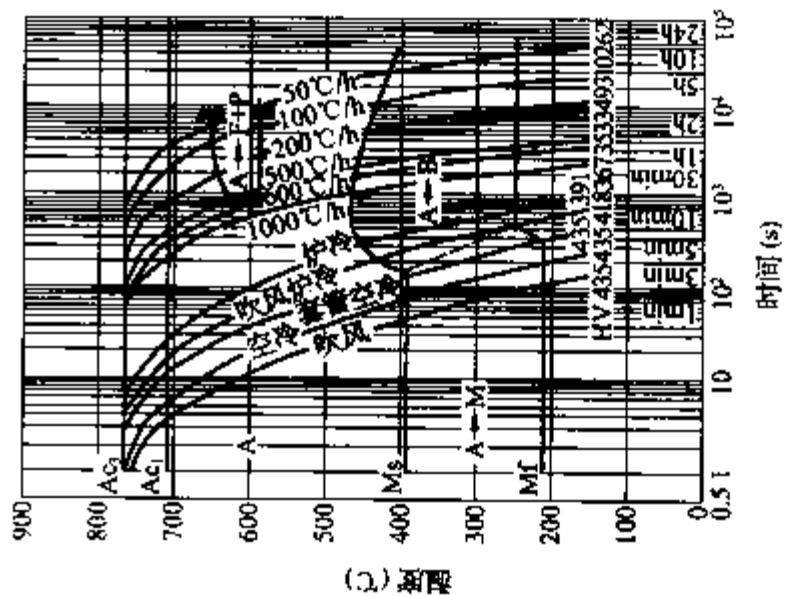


图 6-60 20Cr2Ni4 钢

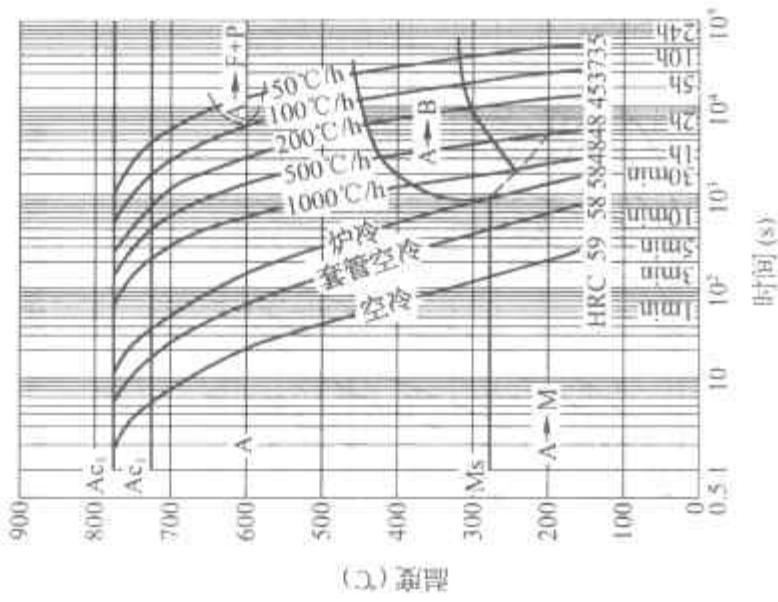


图 6-65 40CrNiMo 钢

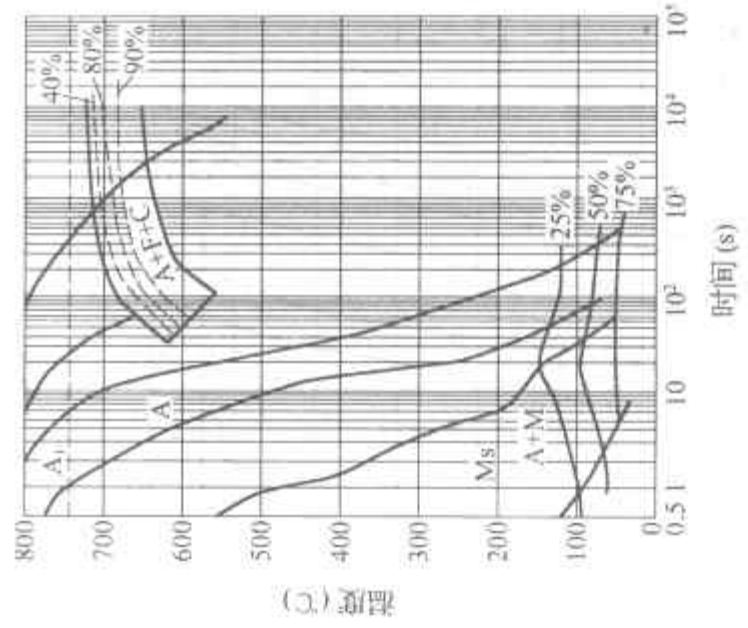


图 6-68 GCr15SiMn 钢

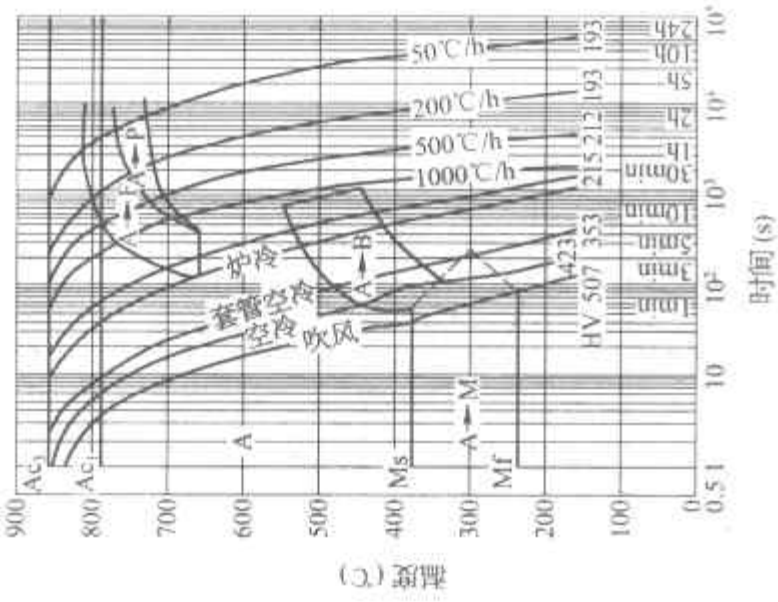


图 6-64 38CrMoAlA 钢

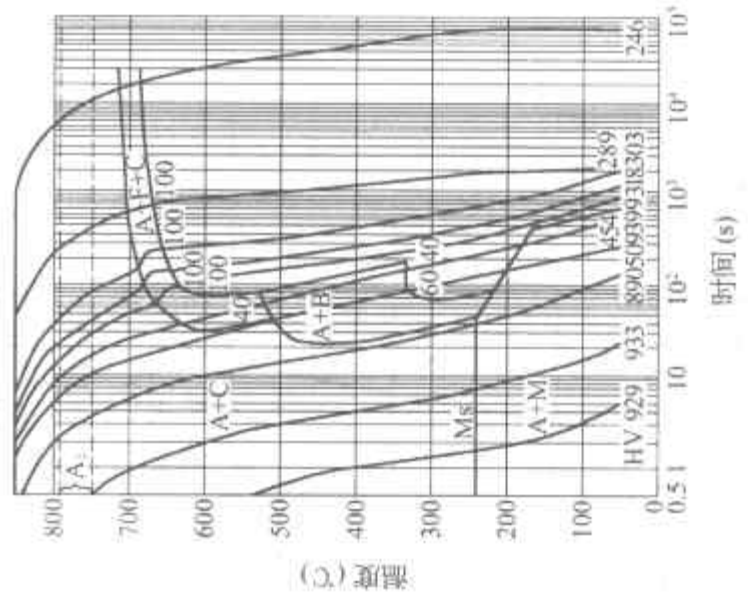


图 6-67 GCr15 钢

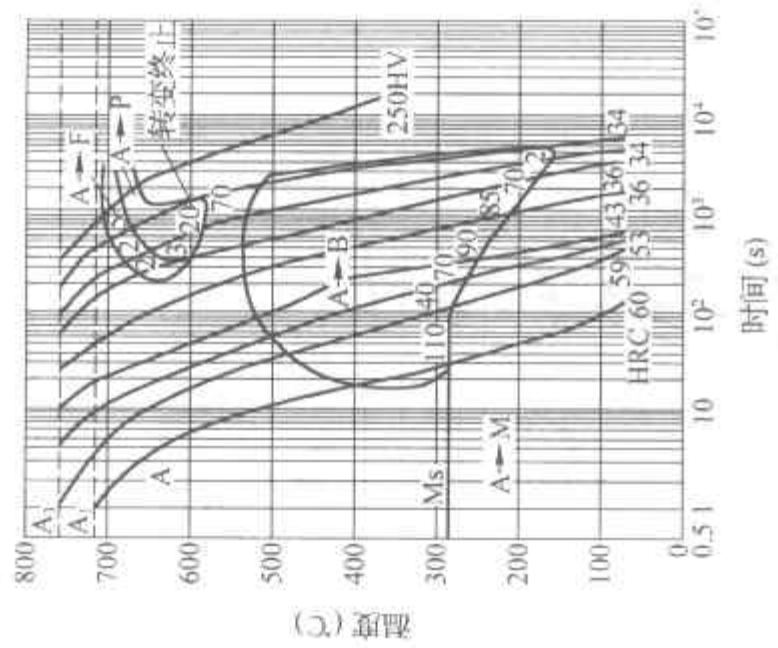


图 6-63 42CrMo 钢

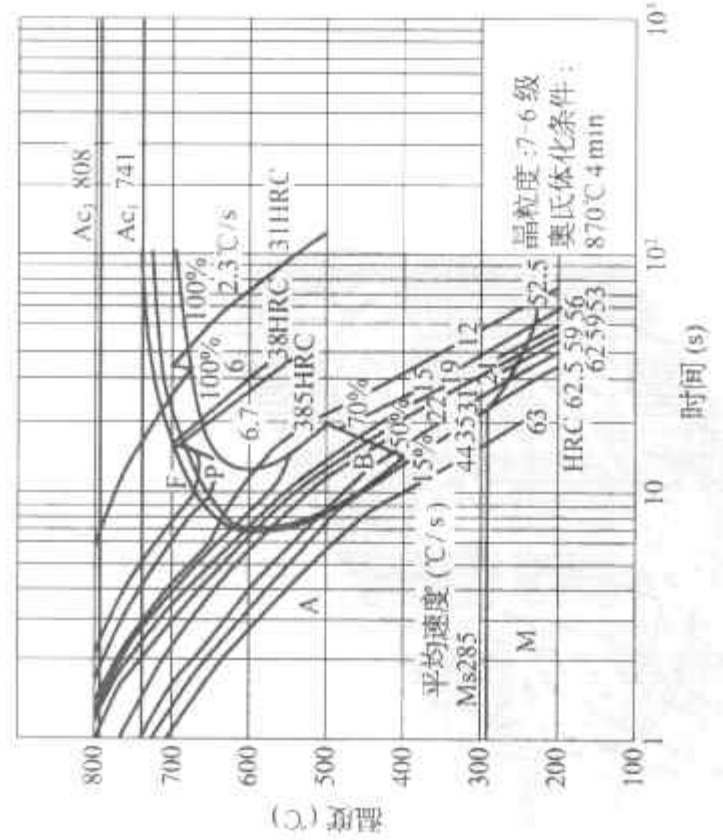


图 6-66 60Si2Mn 钢

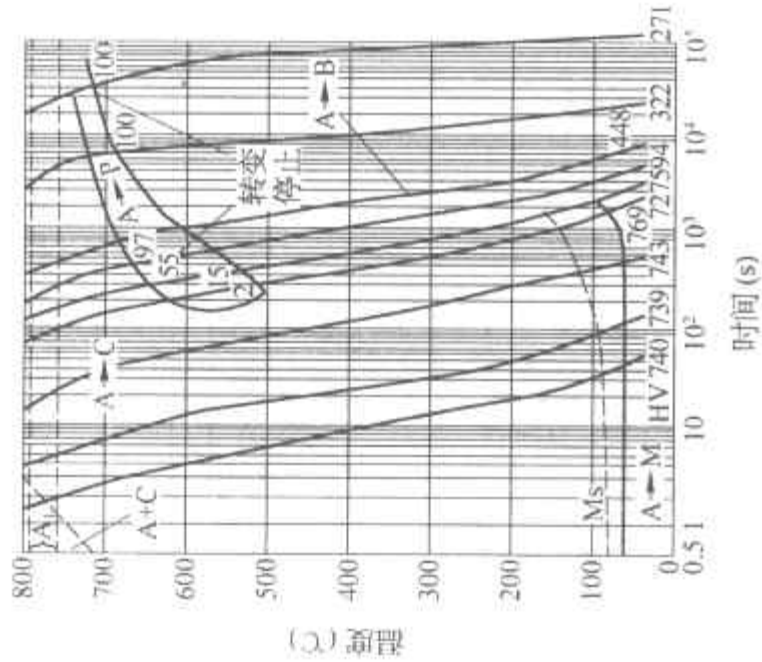


图 6-71 Cr12 钢

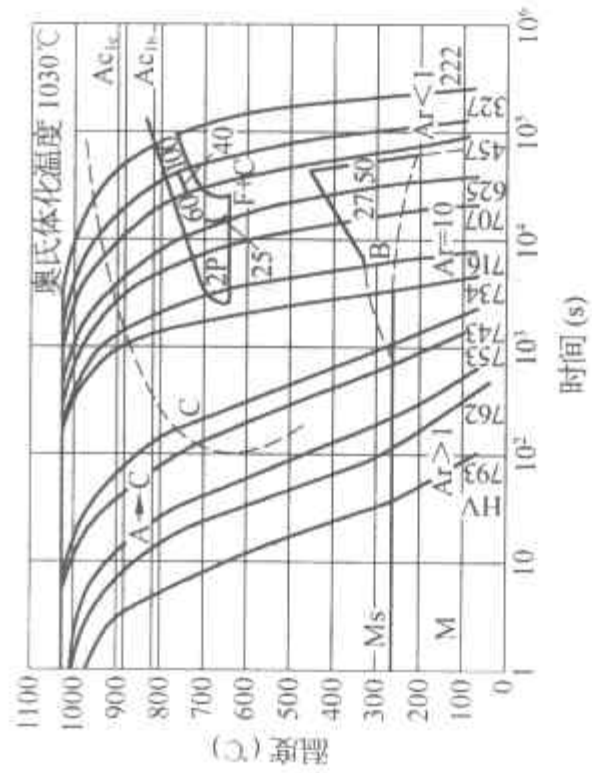


图 6-74 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢

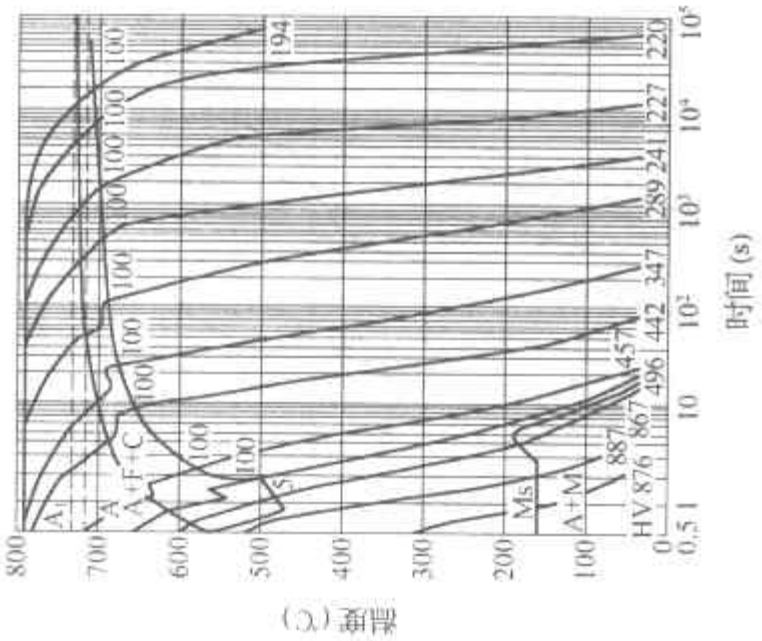


图 6-70 T10 钢

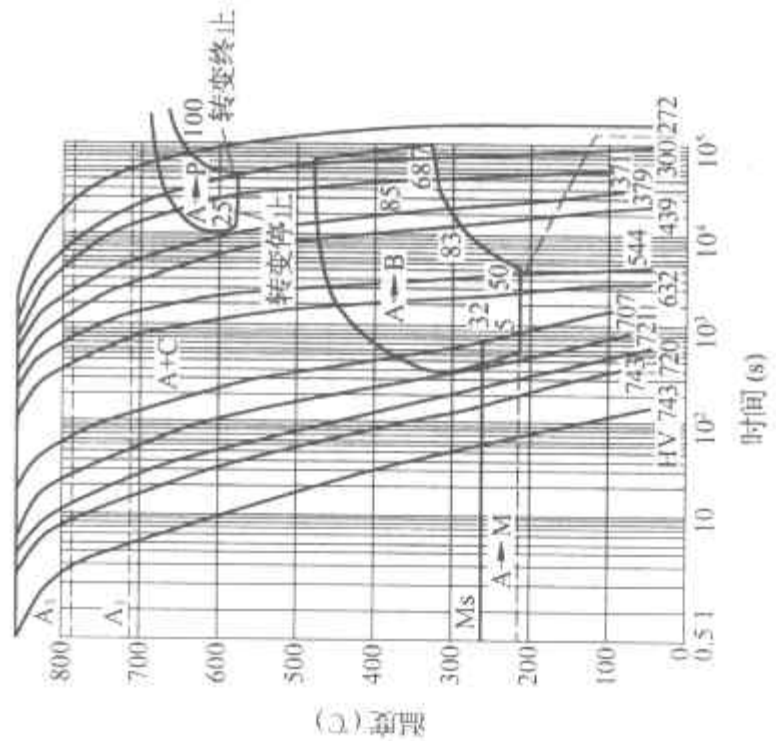


图 6-73 5CrNiMo 钢

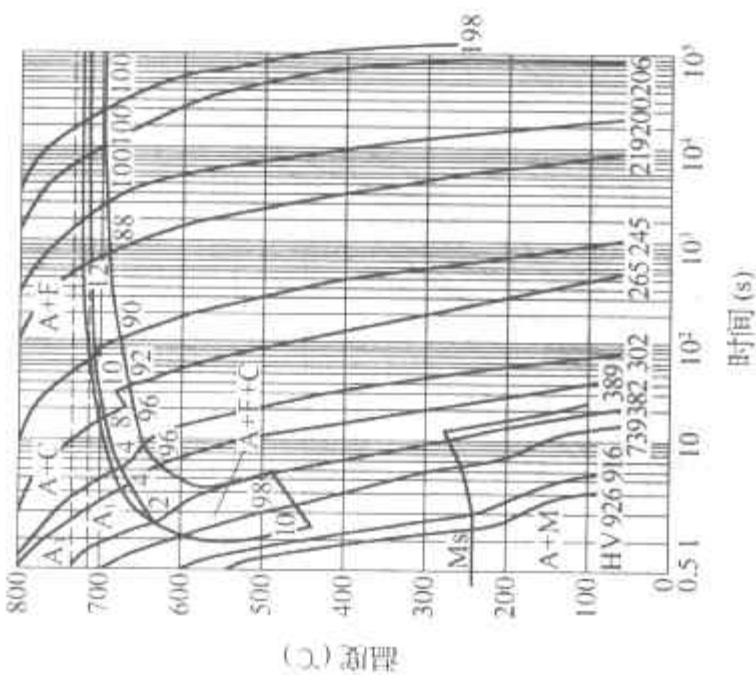


图 6-69 T8 钢

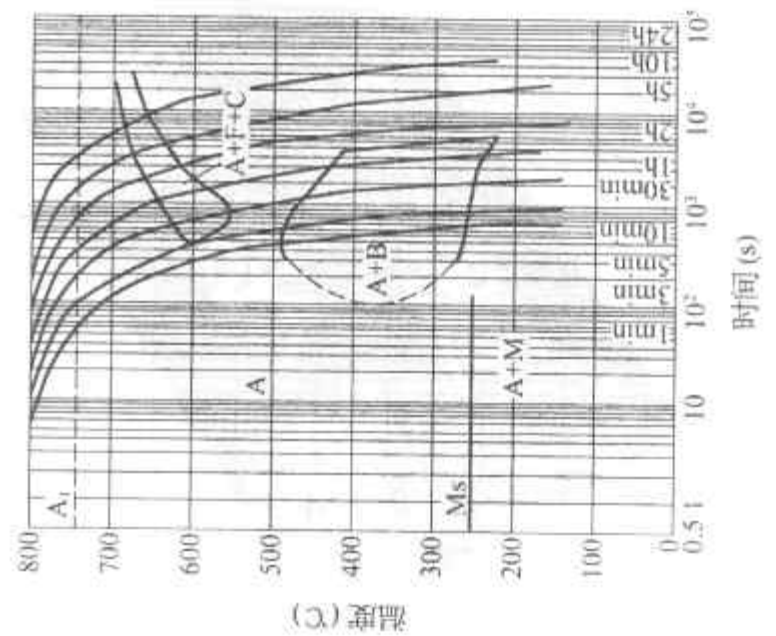


图 6-72 5CrMnMo 钢



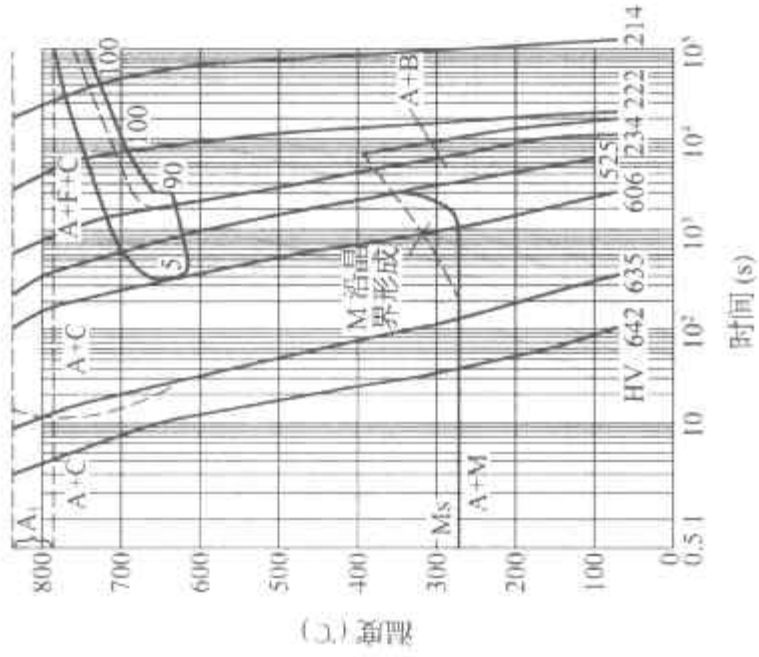


图 6-75 3Cr2W8V 钢

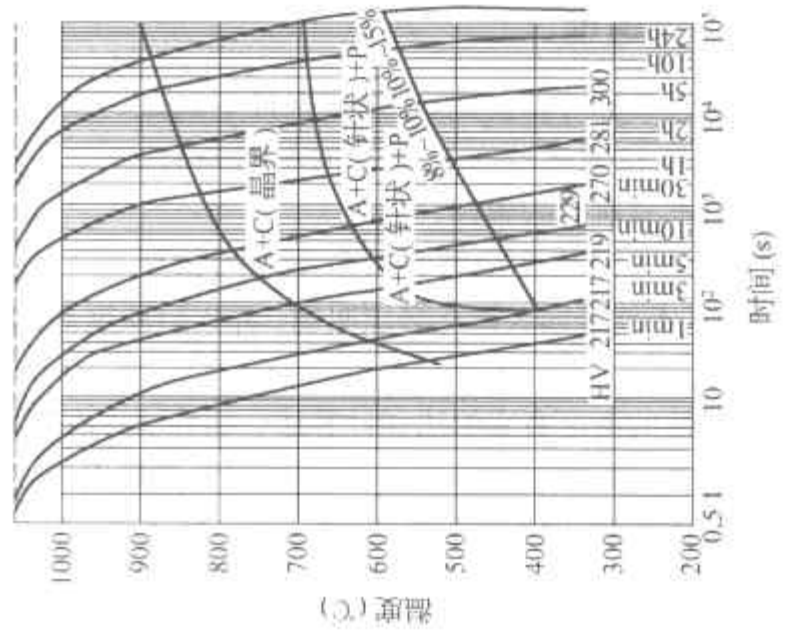


图 6-76 40Cr13 钢

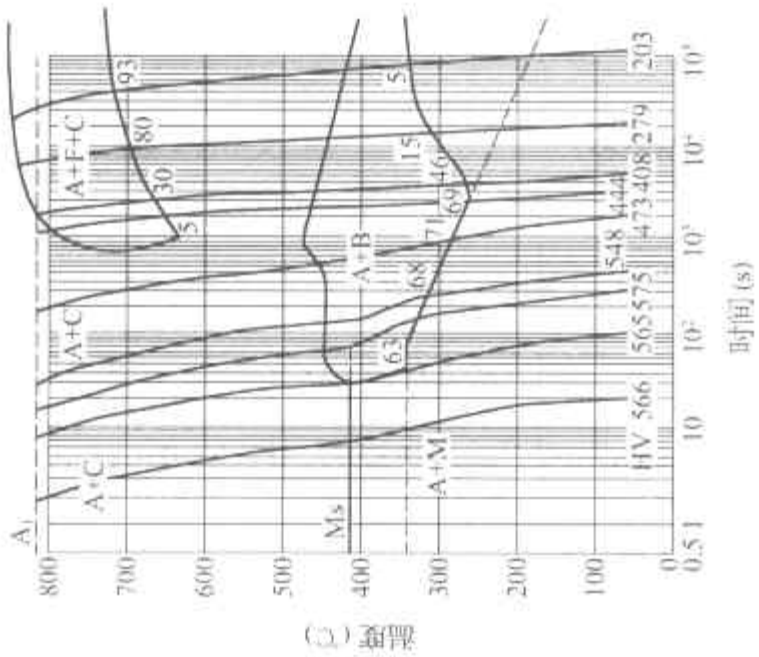


图 6-77 Mn13 钢



## 第二节 淬硬性和淬透性

淬火是热处理工艺中最重要的工艺之一。淬火的目的是为了得到高硬度的马氏体和(或)贝氏体,再经随后的处理获得所要求的力学性能,适用于不同工况条件。

### 一、淬硬性

淬硬性,又称可硬性。指钢在理想(正常淬火)条件下,淬火冷却速度大于临界冷却速度时所能达到的最高硬度(得到马氏体组织)来表征的材料特性。

淬硬性主要与钢含碳的质量分数有关,也就是淬火加热固溶在奥氏体中的碳量有关,含碳量越高,淬硬性越好,见图 6-78。

### 二、淬透性

淬透性又称可淬性,以在规定条件下钢试样淬硬深度和硬度分布来表征的材料特性。它是钢材本身所有的属性。

淬透性和淬硬性是钢材两个不同的物理属性概念,不能等同。因此必须明确:淬火后硬度高的钢,不一定淬透性好;反之,淬火后硬度低的钢,不一定淬透性差。

淬透性的测定有实验法和计算法。实验法中有断口评定法、U形曲线法、临界直径( $d_c$ )法、端淬法。后两种方法生产实际中经常运用。表 6-3 列出常用钢的  $d_{c油}$  和  $d_{c水}$  的数据,供参考。图 6-79~图 6-129 列出各类钢的端淬曲线,明细表见表 6-4。

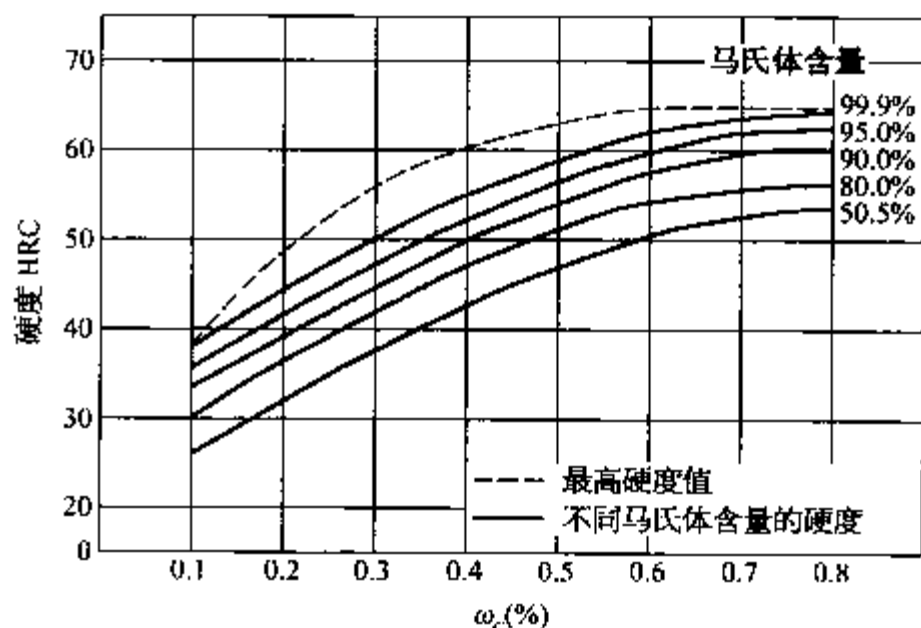


图 6-78 淬火硬度与碳的质量分数的关系

表 6-3 常用钢淬火硬度和临界直径

钢 牌 号	淬 火			临界直径(mm)	
	温度(°C)	介 质	硬度 HRC	$d_{c油}$	$d_{c水}$
渗碳钢、渗氮钢					
20	870~900	盐水	≥170	3.8~4	10.5~12
20MnTiB	860~890	油	≥47	24~27	42~47
15Cr	870	盐水	≥35	12~14.5	26~29
20Cr	860	油	≥28	19~22	36.5~41
15CrMo				70~80	104~115
20CrMo	860~880	油	≥33	47.5~53	75~83
20CrV	855	盐水	≥39	24~28	43~48
20CrMnMo	850	油	≥42	≈114	≈153
20CrMnTi	880	油	≥40	26~30	45~50
30CrMnTi	860	油	≥44	34~38	55~61.5
20CrNiMo	900~925	油	≥41	12~32	28~48

(续表)

钢 牌 号	淬 火			临界直径(mm)	
	温度(°C)	介 质	硬度 HRC	$d_{油}$	$d_{水}$
渗碳钢、渗氮钢					
22CrNiMo	900~925	油	$\geq 43$	15~36	31~54
20CrNi	855~885	油	$\geq 43$	24~28	43~48
12CrNi3	860	油	$\geq 36$	44~50	70~79
12Cr2Ni4	760~800	油	$\geq 36$	90~101	126~138
20Cr2Ni4	860~900	油	$\geq 52$	$\approx 114$	$\approx 153$
18Cr2Ni4W	850	油	$\geq 46$	$\approx 102$	$\approx 140$
38CrMoAl	920~960	油	$\geq 52$	80	100
调 质 钢					
30	850~900	盐水	44	7	15
35	850~890	盐水	45~55	4~8	8~13
45	820~840	盐水	55~60	6~9.5	13~16.5
55	800~820	盐水	60~65	16	21.5
40Mn2	830~850	水/油	54~59	15~90	25~100
45Mn2	810~840	水/油	57~63	15~90	25~100
50Mn2	790~820	油	60~64	15~90	25~100
35SiMn	860~890	水/油	52~57	25~34	40~46
42SiMn	850~880	水/油	55~59	25~35	40~45
40B	840~860	水/油	54~58	10~20	15~25
45B	830~850	水/油	54~60	10~20	15~27
40MnB	820~860	油/热水	54~59	28~40	35~55
45MnB	830~860	油/热水	57~61	20~35	30~50
40MnVB	840~870	水/油	54~59	40~60	60~80
40Cr	840~870	油	54~59	20~30	30~40
45Cr	830~850	油	56~61	20~30	30~40
50Cr	820~840	油	59~65	20~30	40~50
30CrMo	860~890	油	50~55	20~40	35~50
35CrMo	850	油	52	20~40	35~60
42CrMo	850~860	油	55~59	25~35	35~60
40CrMnMo	840~850	油	54~59	$> 110$	$> 150$
30CrMnSi	840~860	油	50	25~40	40~50
40CrNi	840~860	油	54~59	40~60	70~90
45CrNi	810~830	油	56~61	50~70	85~95
30CrNi3	810~840	油	50~54	200	$> 200$
37CrNi3	850~860	油	51~57	200	$> 200$
40CrNiMoA	840~860	油	55~59	20~40	45~60
45CrNiMoVA	850~900	油	58	20~40	45~60

(续表)

钢 牌 号	淬 火			临界直径(mm)	
	温度(°C)	介 质	硬度 HRC	$d_{油}$	$d_{水}$
弹 簧 钢					
60	800~820	水	62~63	12	24
65	780~820	水	62~63	12	24
75	780~820	水	62~63	13	25
85	780~820	水	62~63	14	26
60Mn	820~840	水/油	57~64	20	36
65Mn	780~840	水/油	57~64	20	36
50CrV	850~890	油	56~62	32	51
50CrMn	840~860	油	≥58	36	56
50CrMnV	840~860	油	≥58	36	56
60Si2Mn	860~880	油	≥60	22	38
轴 承 钢					
GCr6	800~825	油	62~66	12	24
GCr9	800~850	油	62~66	13	25
GCr15	830~860	油	62~66	15	28
GCr15SiMn	820~860	油	≥62	29	46
工 具 钢、不 锈 钢					
T8	760~770	盐水	63~65	5	13
T10	770~790	盐水	63~65	14	26
T12	770~790	盐水	63~65	18	33
9SiCr	860~880	油	63~66	95%M 40~50	
CrWMn	820~850	油	64~66	95%M 40~50	
9Mn2V	780~800	油	≥58	33	42
9CrWMn	820~830	油	≥58	75	95
Cr12	960~980	油	≥60	90%M 200	
Cr12MoV	1 020~1 050	油	≥60	90%M 400	
5CrMnMo	830~860	油	53~58	90%M 140	
5CrNiMo	840~870	油	53~60	90%M 140	
3Cr2W8V	1 050~1 100	油	49~52		
4Cr5MoVSi(H11)	1 000~1 030	油	53~55		
4Cr5MoV1Si(H13)	1 020~1 050	油	55~58		
W18Cr4V	1 260~1 300	油	≥62		
W9Cr4V2	1 220~1 240	油	63~65		
W6Mo5Cr4V2	1 200~1 240	油	62~64		
20Cr13	1 000~1 050	油	≥43		
40Cr13	1 020~1 050	油	50~57		
95Cr18	1 000~1 100	油	58~60		

表 6-4 端淬曲线明细表

图号	钢牌号	化学成分(质量分数,%)										奥氏体温度(°C)	晶粒度
		渗碳钢·渗氮钢											
		$w_C$	$w_{Si}$	$w_{Mn}$	$w_{Cr}$	$w_{Ni}$	$w_{Mo}$	$w_W$	$w_V$	$w_{Ti}$	其他		
图 6-79	20	0.17~0.24	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.25	≤0.25						840	6~8 级
图 6-80	20Cr	0.17~0.23	0.2~0.35	0.6~1.0	0.5~1.0							825	
图 6-81	20CrH	0.17~0.23	0.17~0.37	0.5~0.85	0.7~1.1							870±5	
图 6-82	20CrMo	0.17~0.23	0.2~0.35	0.6~1.0	0.3~0.7	0.08~0.15						925	
图 6-83	22CrMnMo	0.17 0.18~0.24	0.30 0.1~0.22	1.05 0.86~1.2	1.22 0.9~1.2	0.27 0.2~0.3						850 900	
图 6-84	20CrMnTi	0.16~0.24	0.17~0.37	0.8~1.1	1.0~1.3			0.06~0.12					
图 6-85	20CrNiMo	0.17~0.23	0.2~0.35	0.6~0.95	0.35~0.65	0.35~0.75	0.15~0.25						
图 6-86	12CrNi3	0.07~0.13	0.2~0.35	0.3~0.7	1.3~1.8							845	
图 6-87	20CrNi3H	0.07~0.23	0.17~0.37	0.3~0.65	0.6~0.95	2.70~3.25						830±5	
图 6-88	12Cr2Ni4	0.11~0.17	0.17~0.37	0.3~0.6	1.25~1.75	3.25~3.75						840	
图 6-89	20Cr2Ni4	0.2	0.36	0.37	1.6	3.47			$w_{P0.015}$	$w_{S0.003}$		840	
图 6-90	18Cr2Ni4W	0.21~0.19		0.35~0.36	0.15~0.14	4.15~4.15	0.1~0.1	0.72~0.75					
图 6-91	25Cr2MoV	0.25	0.19	0.56	2.30	0.2		0.22				860	
图 6-92	40Cr2MoV	0.43	0.21	0.62	1.78	0.35		0.22				870	
图 6-93	38CrMoAl	0.33		0.70	1.42	0.25				$w_N 1.0$		870	7 级
调 质 钢													
图 6-94	35	0.32~0.39	0.17~0.37	0.5~0.8	≤0.25	≤0.25						870	5~8 级
图 6-95	45	0.42~0.49	0.17~0.37	0.5~0.8	≤0.25	≤0.25						840	6~7 级
图 6-96	45H	0.42~0.49	0.17~0.37	0.5~0.8	0.7~1.1							850±5	
图 6-97	55	0.52~0.60	0.17~0.37	0.5~0.8	≤0.25	≤0.25						840	6~8 级



(续表)

图号	钢牌号	化学成分(质量分数,%)										奥氏体 温度(°C)	晶粒度		
		$\omega_C$	$\omega_{Si}$	$\omega_{Mn}$	$\omega_{Cr}$	$\omega_{Ni}$	$\omega_{Mo}$	$\omega_W$	$\omega_V$	$\omega_{Ti}$	其他				
<b>弹 簧 钢</b>															
图 6-113	50CrV	0.51~0.52		0.51~0.46	1.04~0.94			0.18~0.19						7~6 级	
图 6-114	60Si2Mn	0.54~0.63	1.65~1.98	0.70~0.83											
<b>轴 承 钢</b>															
图 6-115	GCr9	1.09	0.29	0.35	1.21										
图 6-116	GCr15	0.95~1.10	0.15~0.35	<0.5	1.30~1.60										
图 6-117	GCr9SiMn	1.01	0.52	1.12	1.08										
图 6-118	GCr15SiMn	0.95~1.10	0.40~0.70	0.90~1.15	0.90~1.20										
图 6-119	GSiMnMoV	0.95~1.10	0.45~0.65	0.75~1.05				0.20~0.30			$\omega_S \leq 0.03$		800		
图 6-120	GSiMnMoVRE	0.95~1.05	1.10~1.40	0.15~0.40				0.15~0.25		$\omega_{RE} 0.1$	$\omega_S \leq 0.03$		800, 860		
<b>工 具 钢</b>															
图 6-121	T8	0.82	0.25	0.40										790	6~8 级
图 6-122	T12	1.15~1.24	0.15~0.30	0.15~0.30										760	
图 6-123	9Mn2V	0.85~0.95	$\leq 0.35$	1.70~2.00							0.15~0.25			790	
图 6-124	9SiCr	0.85~0.95	1.20~1.60	0.30~0.60	0.95~1.25									820~860	
图 6-125	9CrWMn	0.93	0.16	1.12	0.66	0.09		0.72						830	
图 6-126	CrV	1.00			1.40						0.2			840	
图 6-127	4CrMnMo	0.43		0.85	1.15									815~885	
图 6-128	5Cr2W2V	0.53	0.28	0.20	1.65			2.00			0.25			890	
图 6-129	5Si2MnMo1V	0.55	2.0	0.90	0.25						0.25			860	

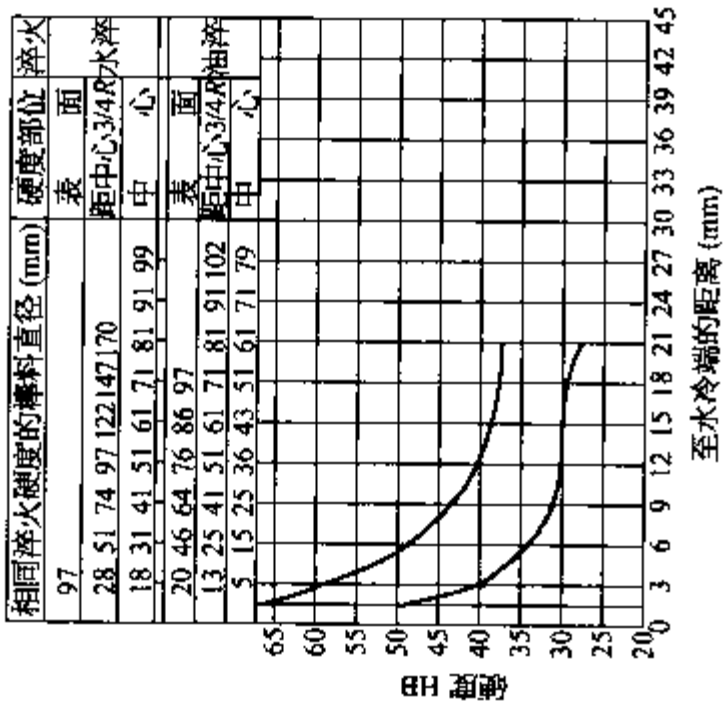


图 6-79 20 钢

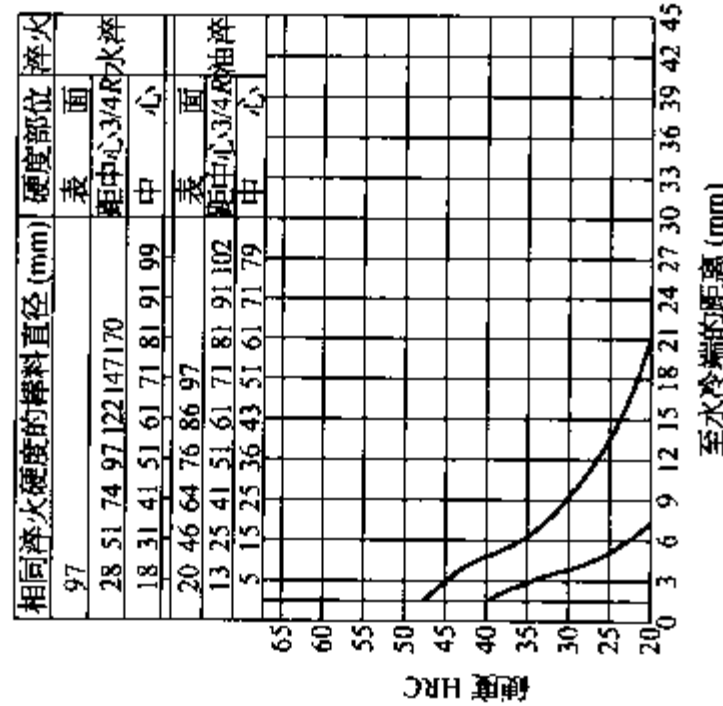


图 6-80 20Cr 钢

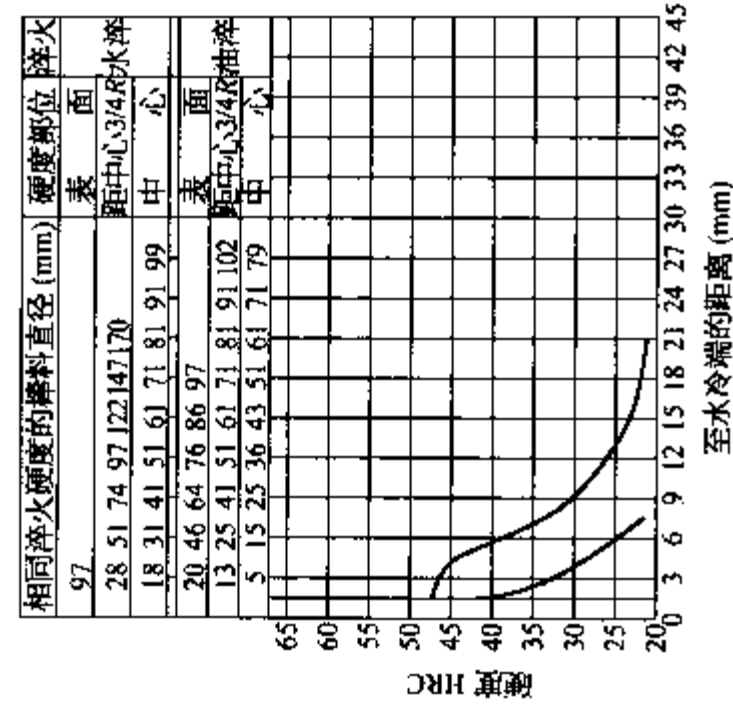


图 6-81 20CrH 钢

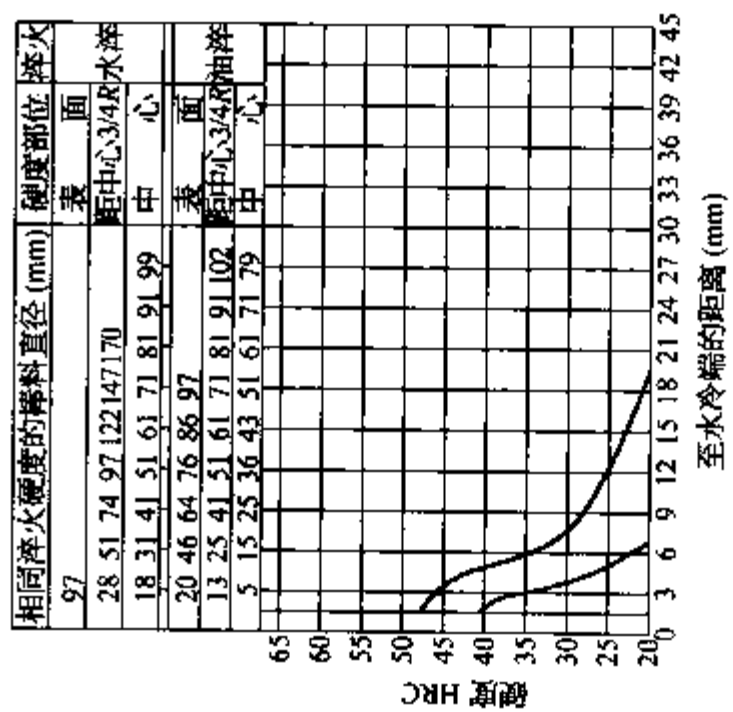


图 6-82 20CrMo 钢

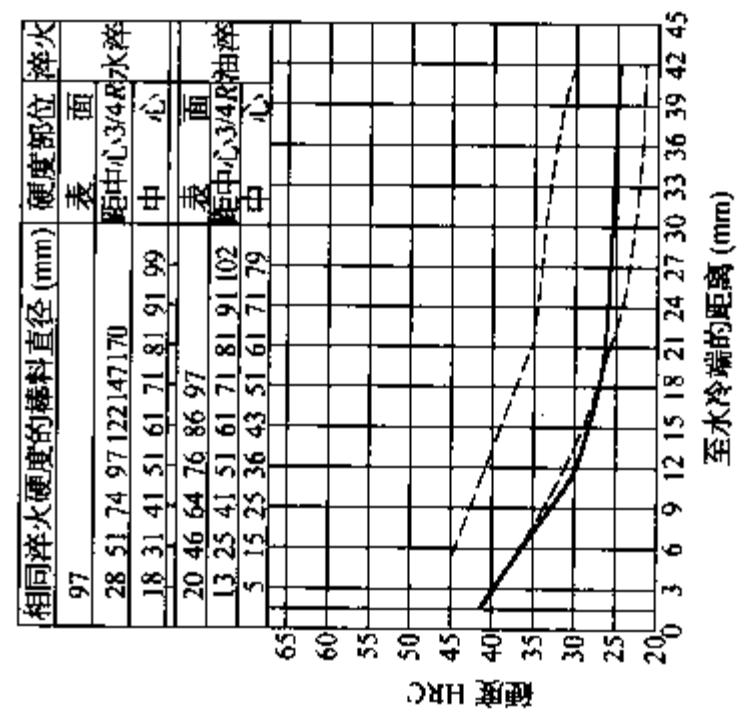


图 6-83 22CrMnMo 钢

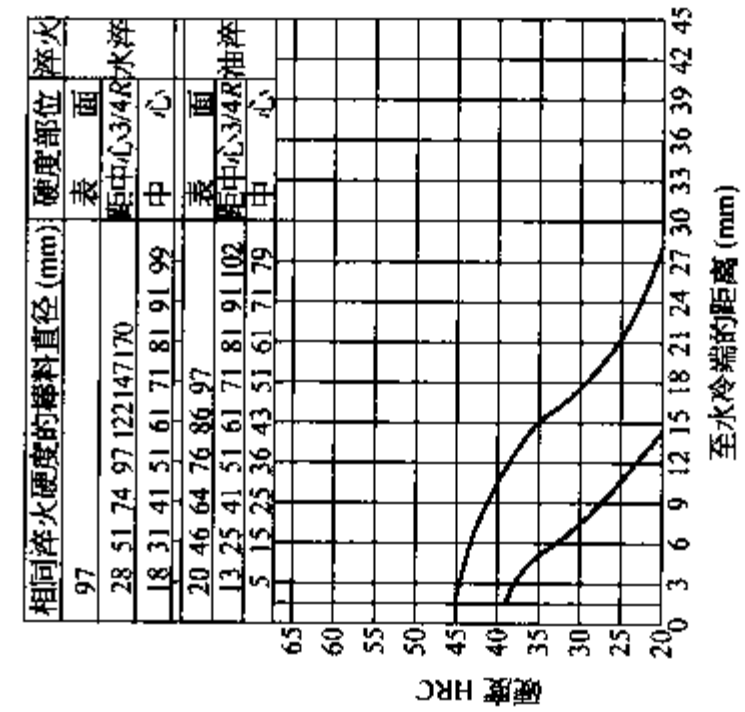


图 6-84 20CrMnTi 钢

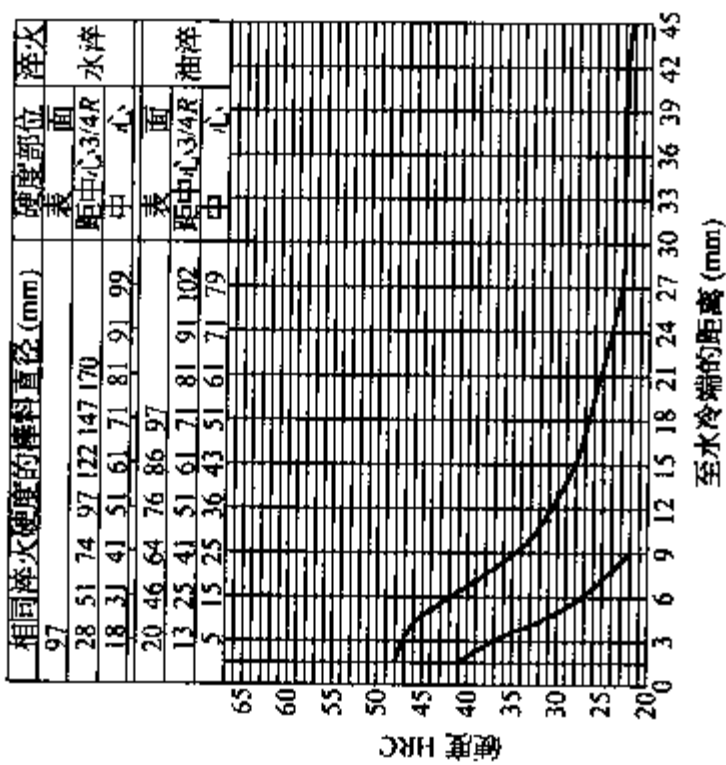


图 6-85 20CrNiMo 钢的淬透性曲线

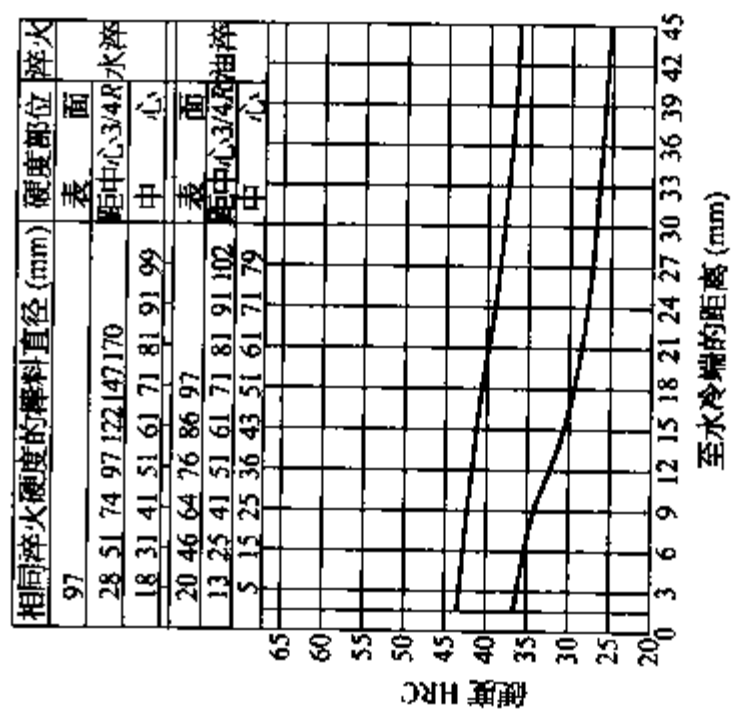


图 6-88 12Cr2Ni4 钢

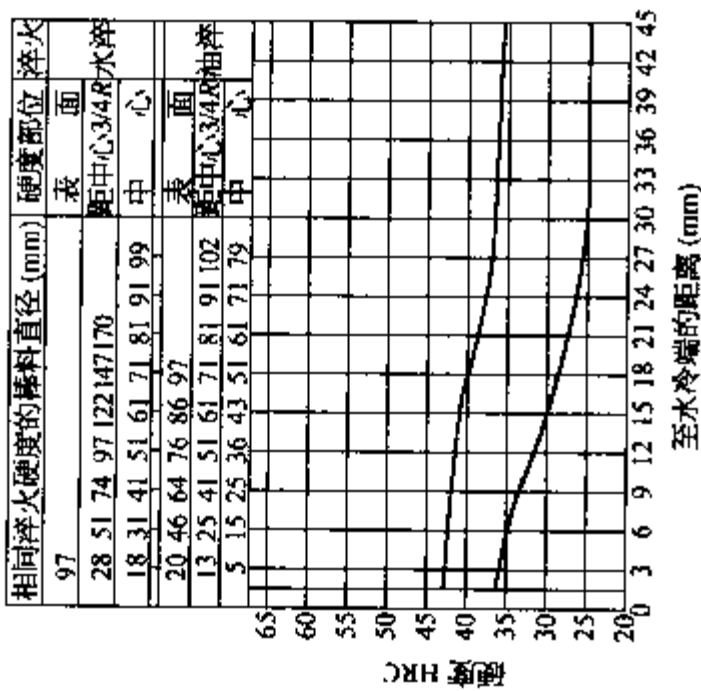


图 6-86 12CrNi3 钢

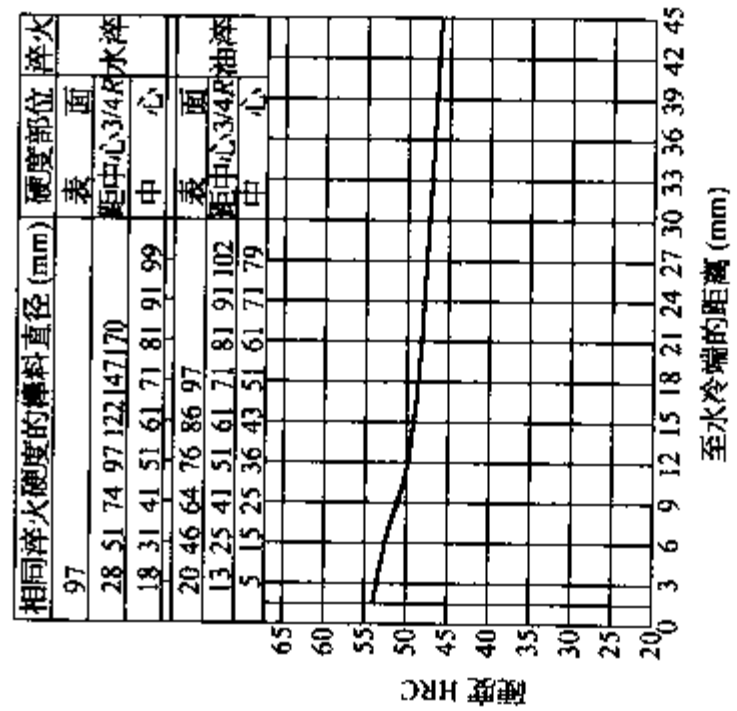


图 6-89 20Cr2Ni4 钢

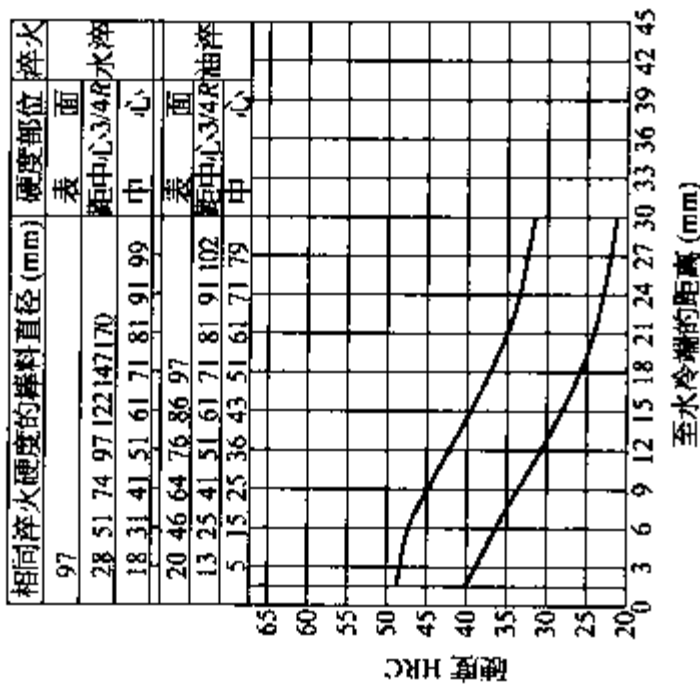


图 6-87 20CrNi3H 钢

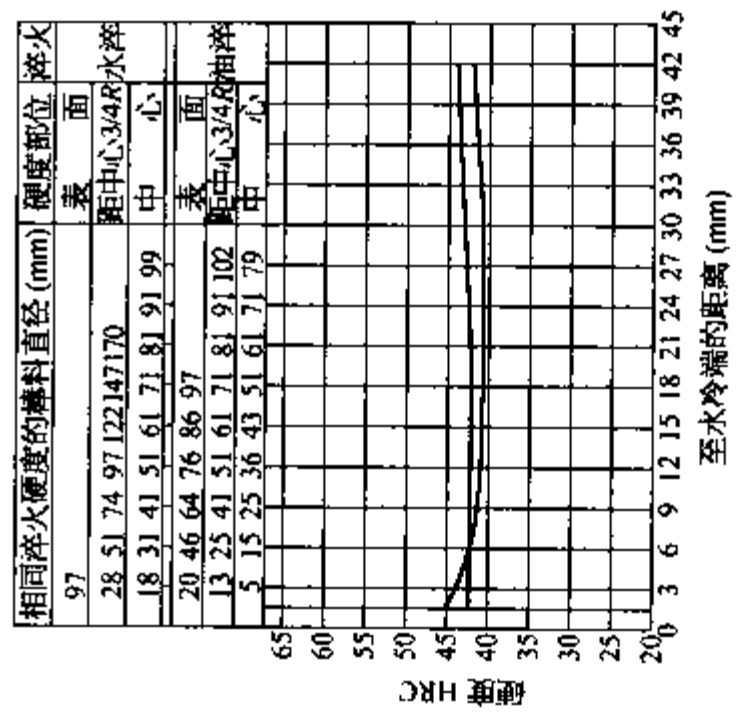


图 6-90 18Cr2Ni4W 钢



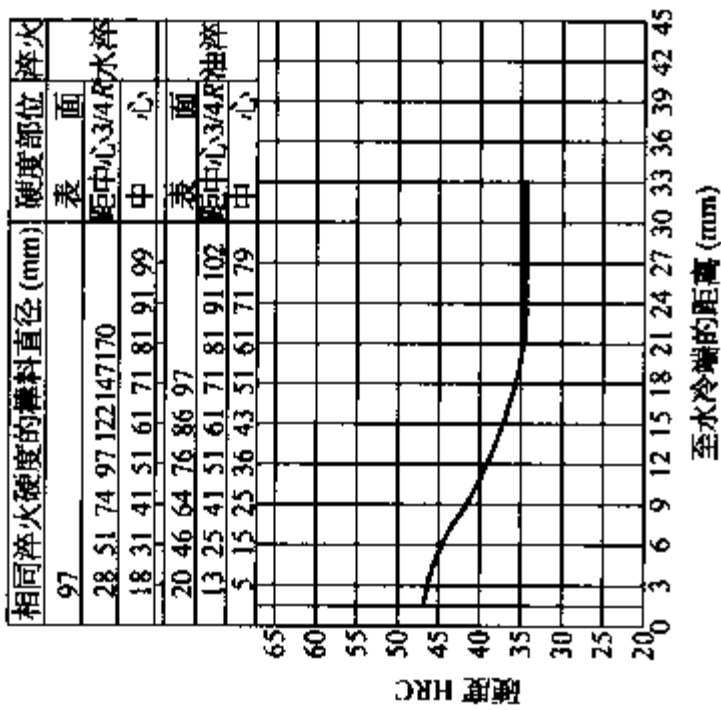


图 6-91 25Cr2MoV 钢

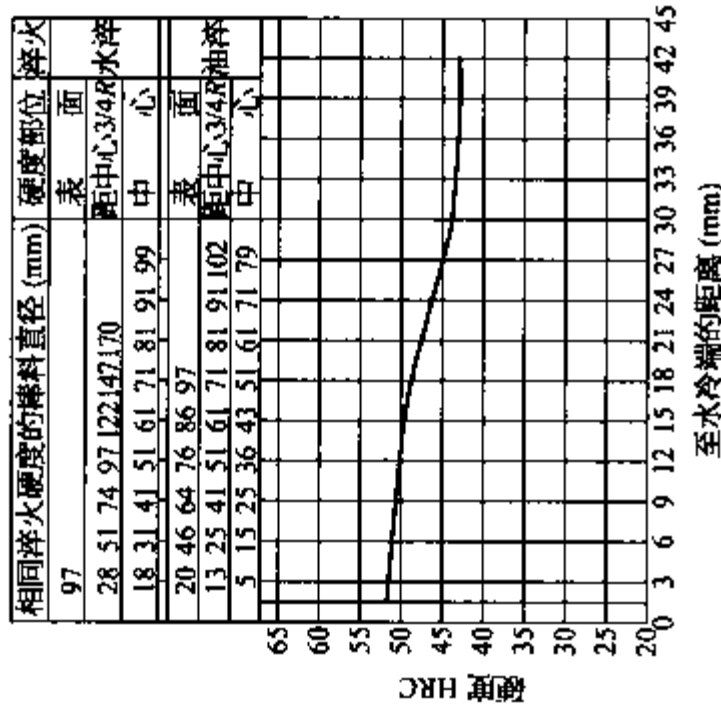


图 6-92 40Cr2MoV 钢

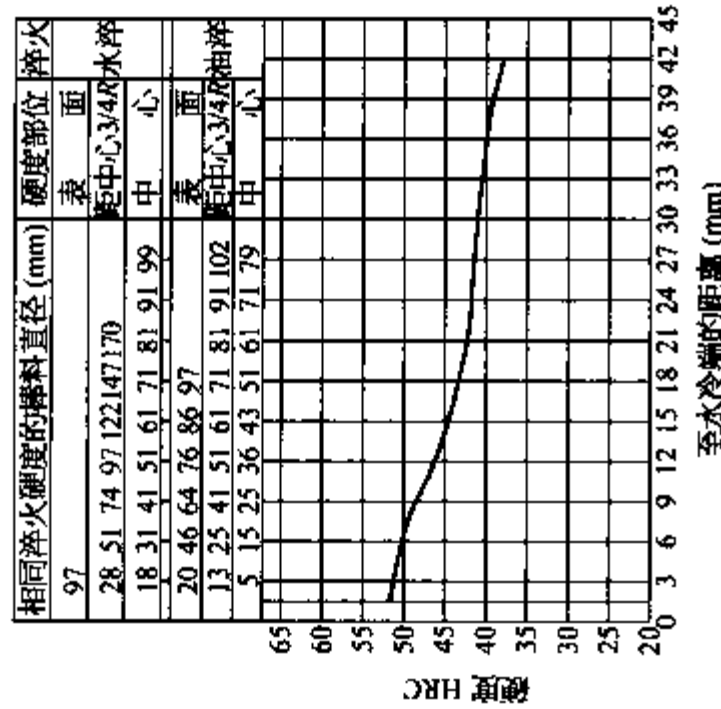


图 6-93 38CrMoAl 钢

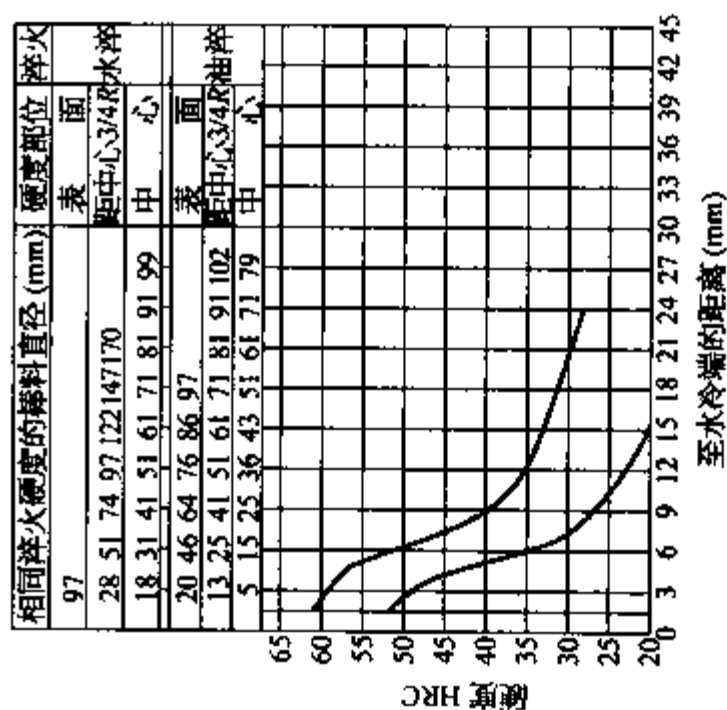


图 6-94 35 钢

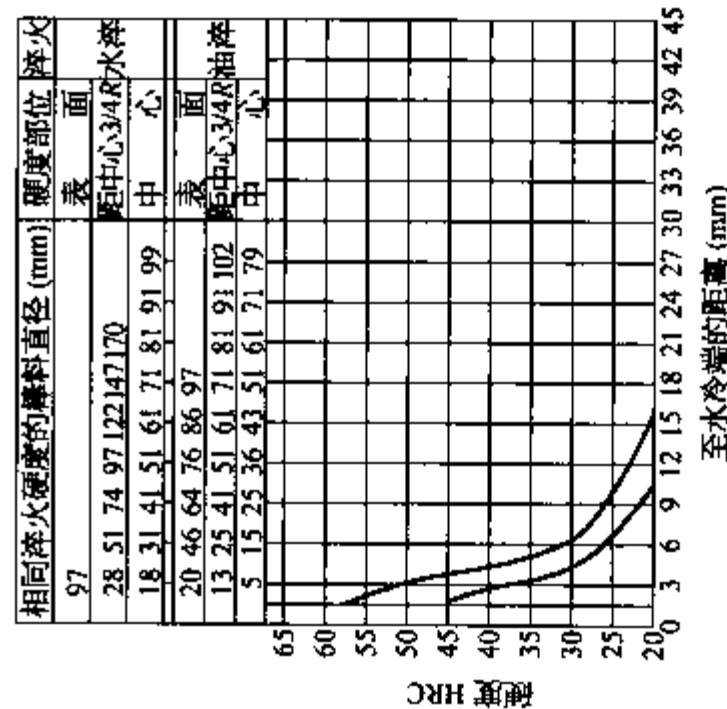


图 6-95 45 钢

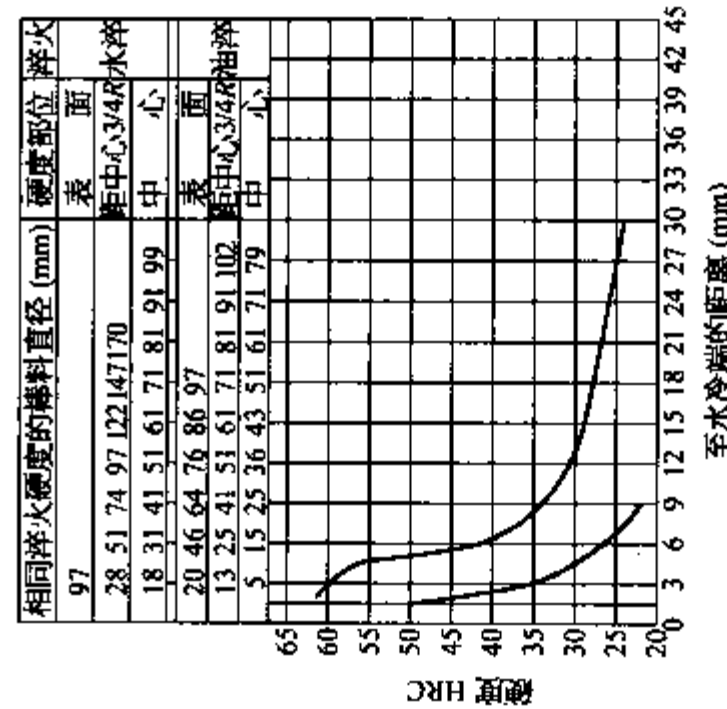


图 6-96 45H 钢

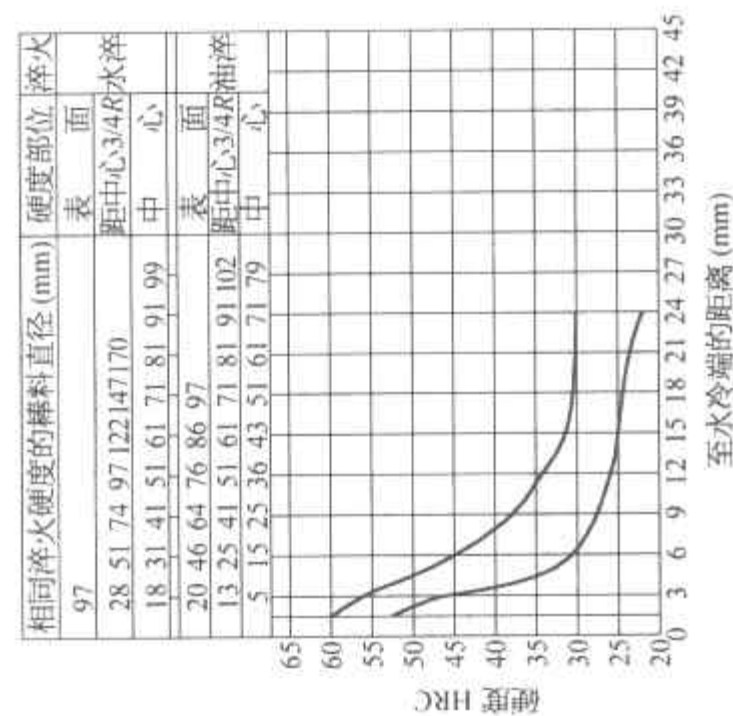


图 6-97 55 钢

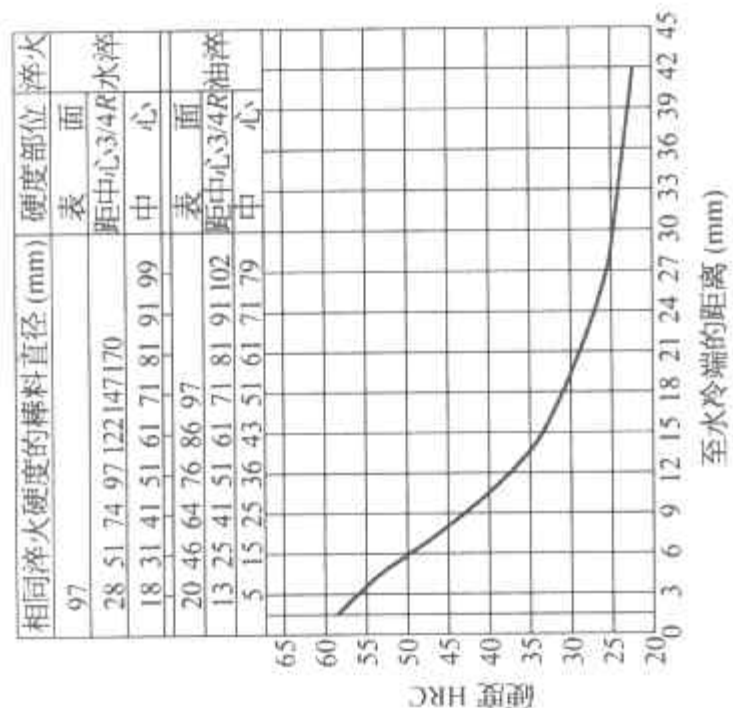


图 6-98 35SiMn 钢

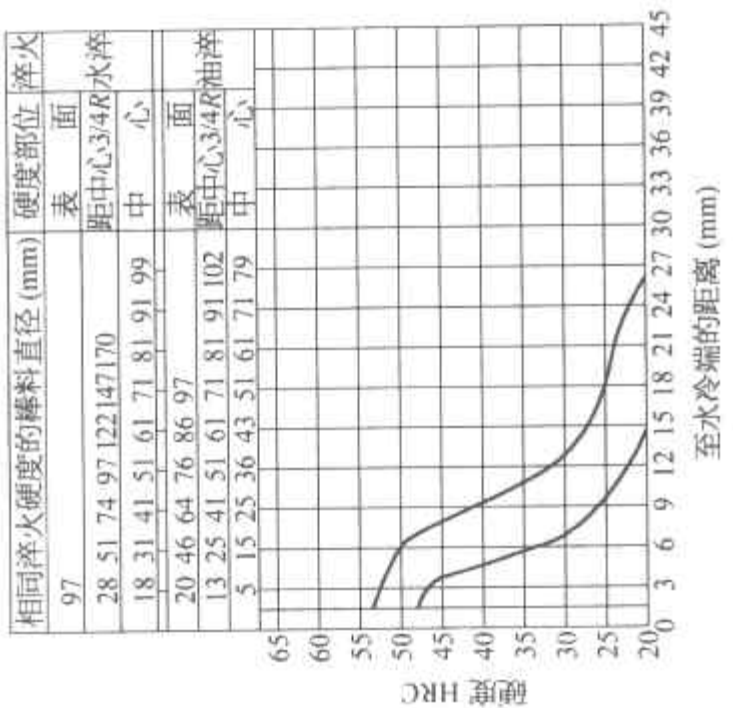


图 6-99 40B 钢

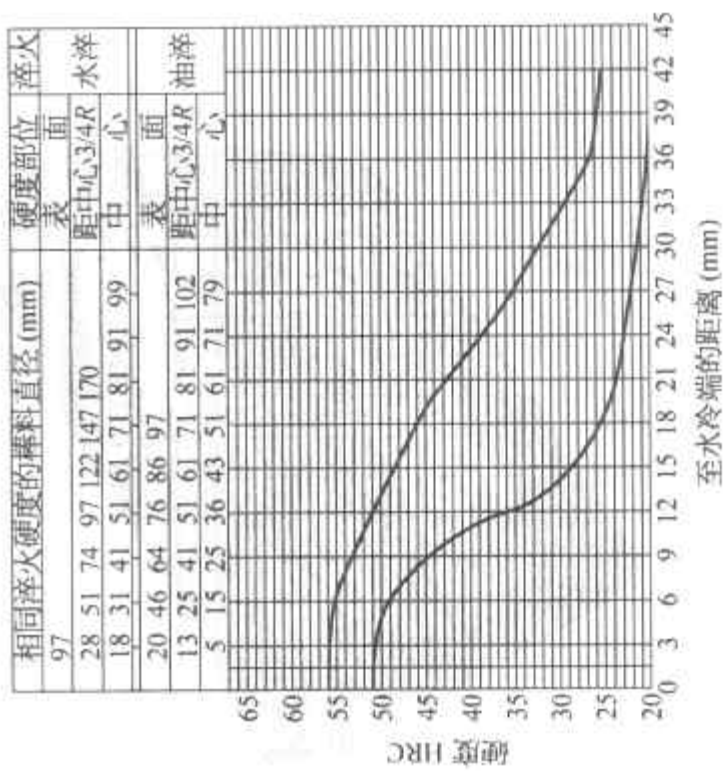


图 6-100 45MnB 钢

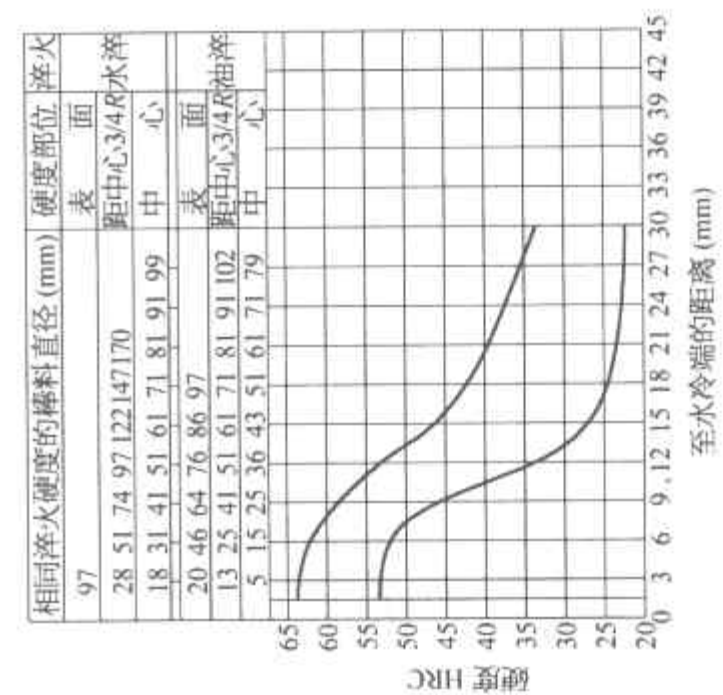


图 6-101 45MnBH 钢

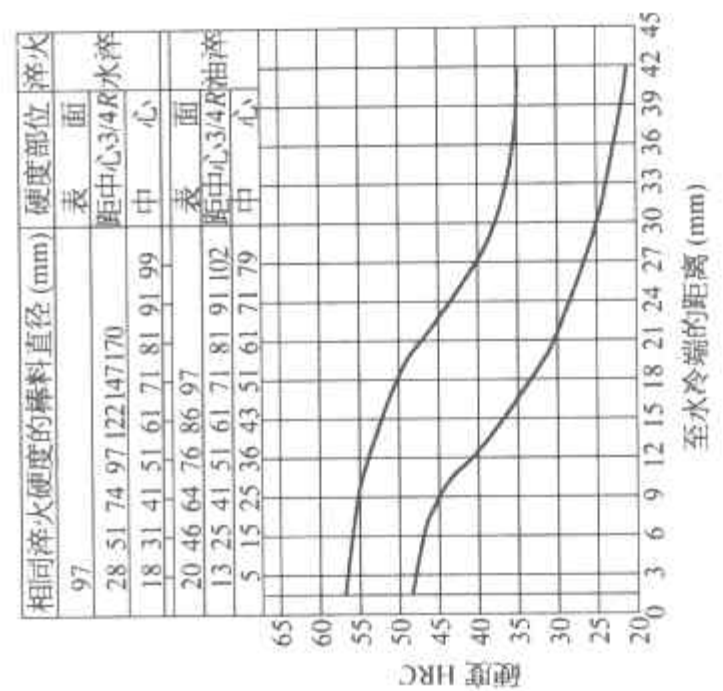


图 6-102 40MnVB 钢

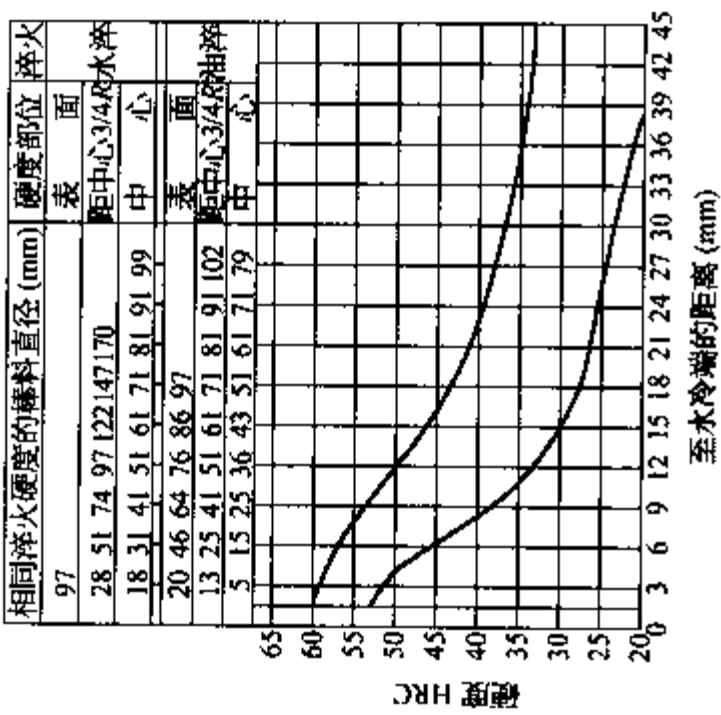


图 6-103 40Cr 钢

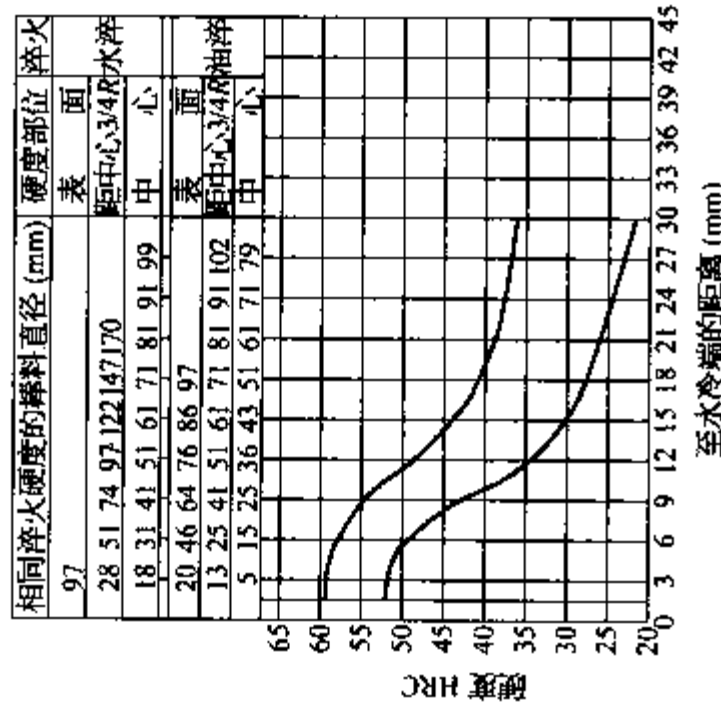


图 6-104 40CrH 钢

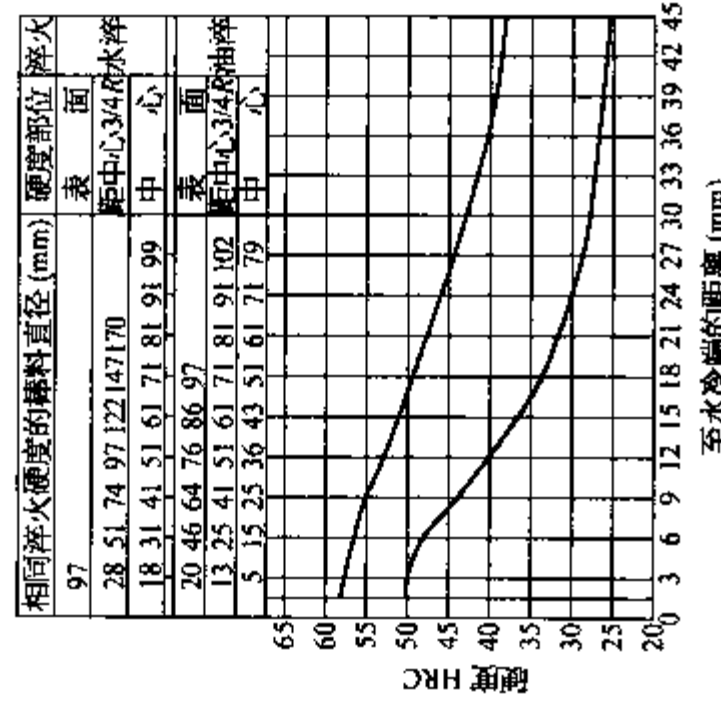


图 6-105 35CrMo 钢

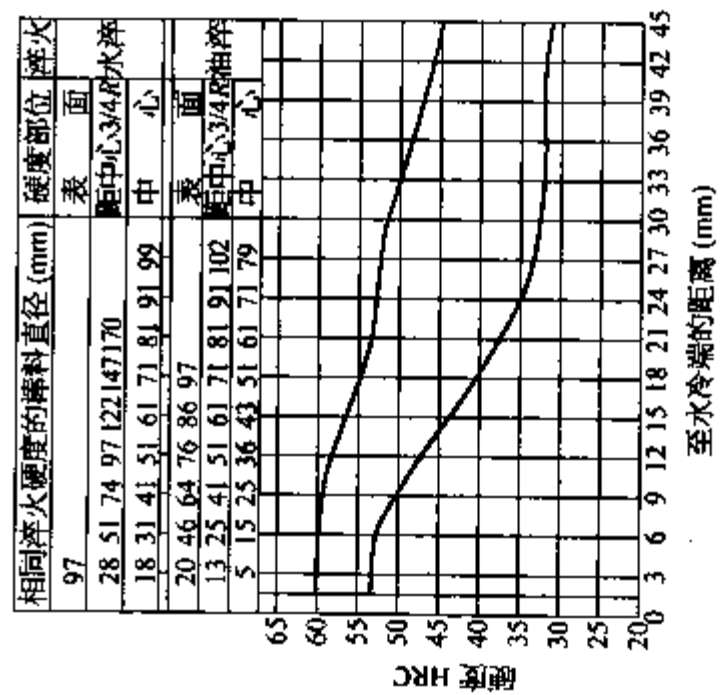


图 6-106 42CrMo 钢

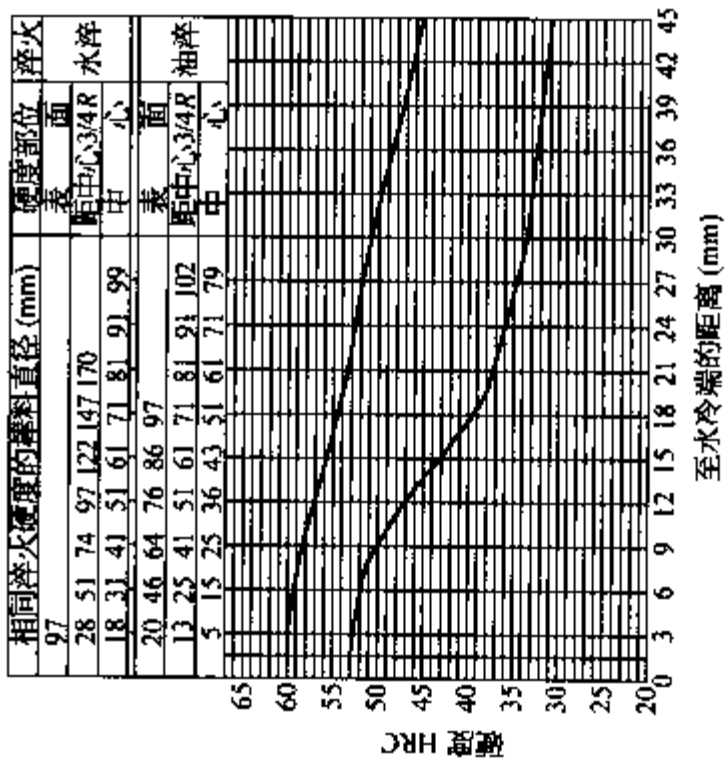


图 6-107 40CrMnMo 钢

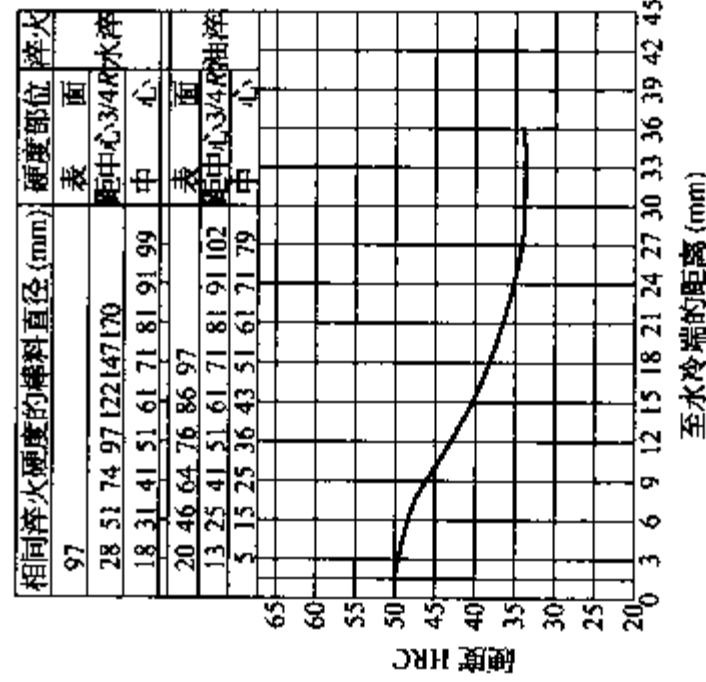


图 6-108 30CrMnSi 钢

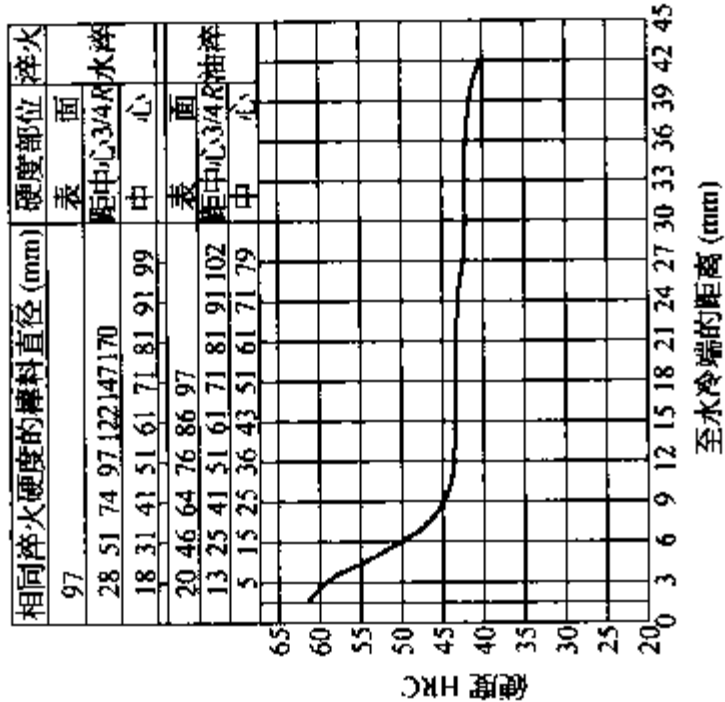


图 6-111 85 钢

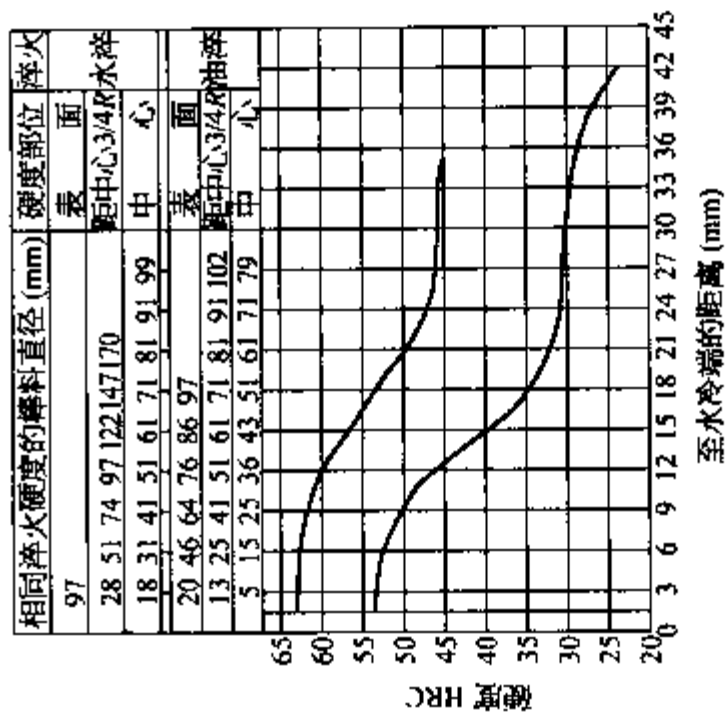


图 6-114 60Si2Mn 钢

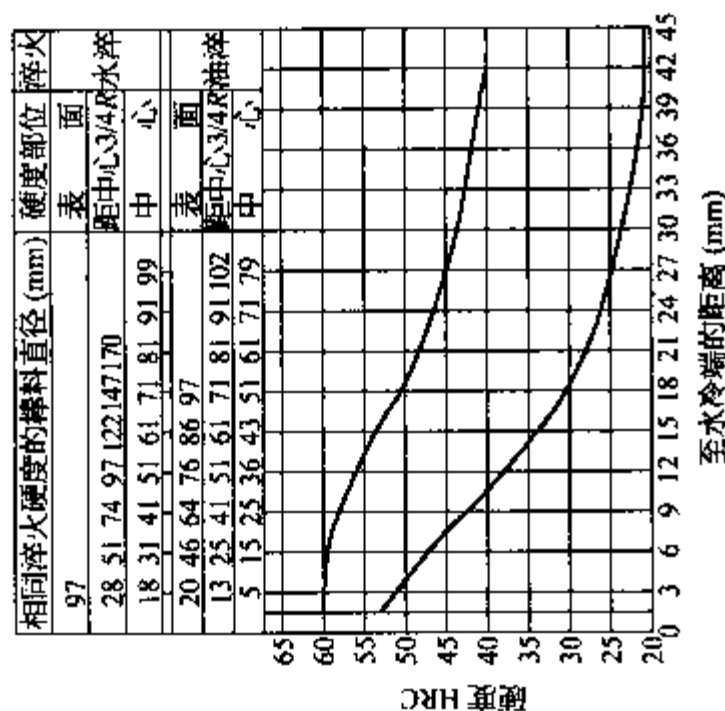


图 6-110 40CrNiMo 钢

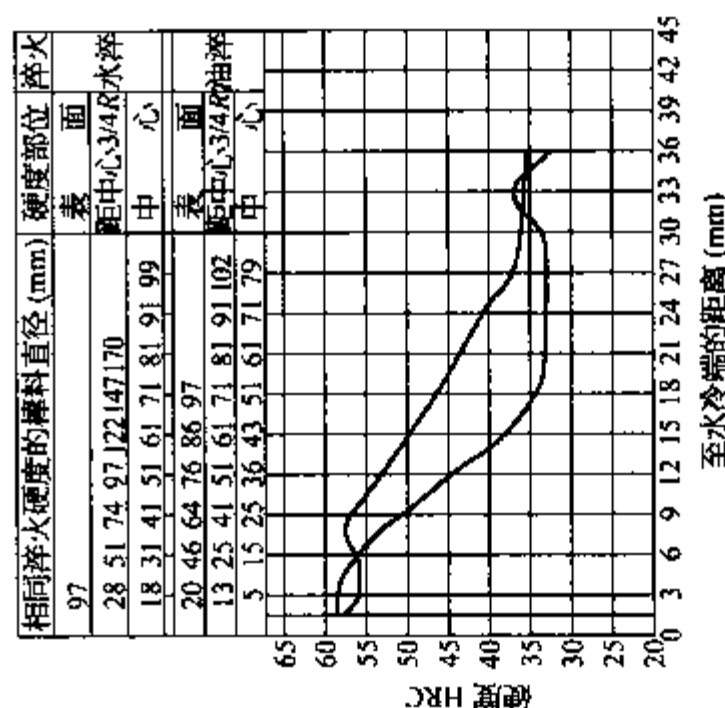


图 6-113 50CrV 钢

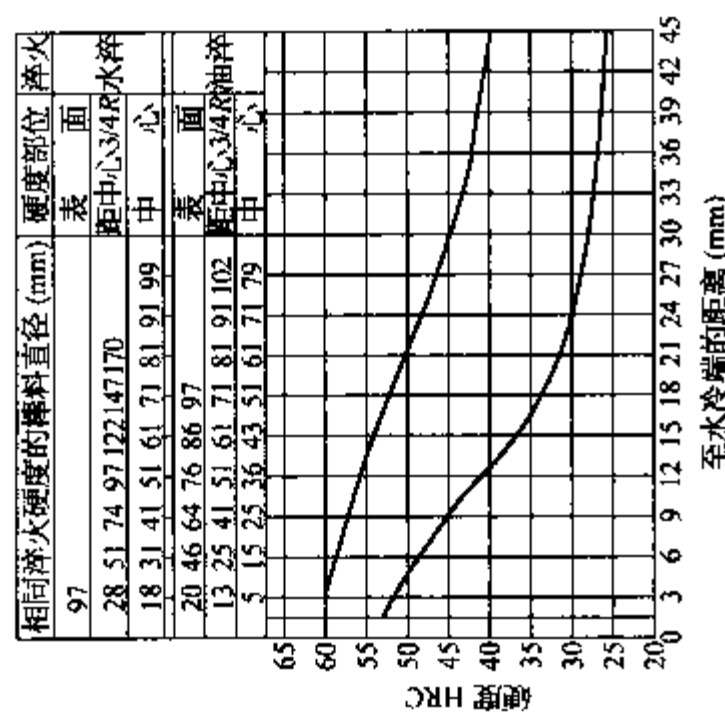


图 6-109 40CrNi 钢

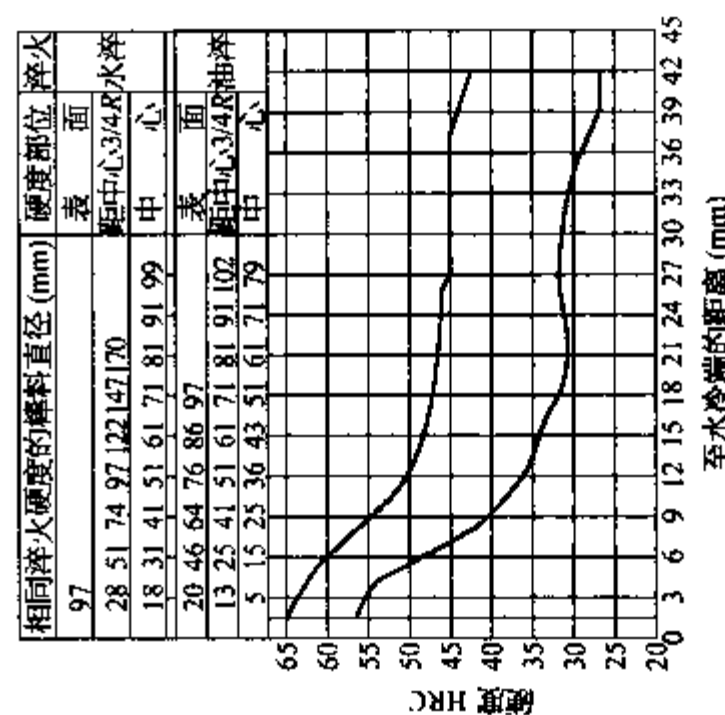


图 6-112 65Mn 钢

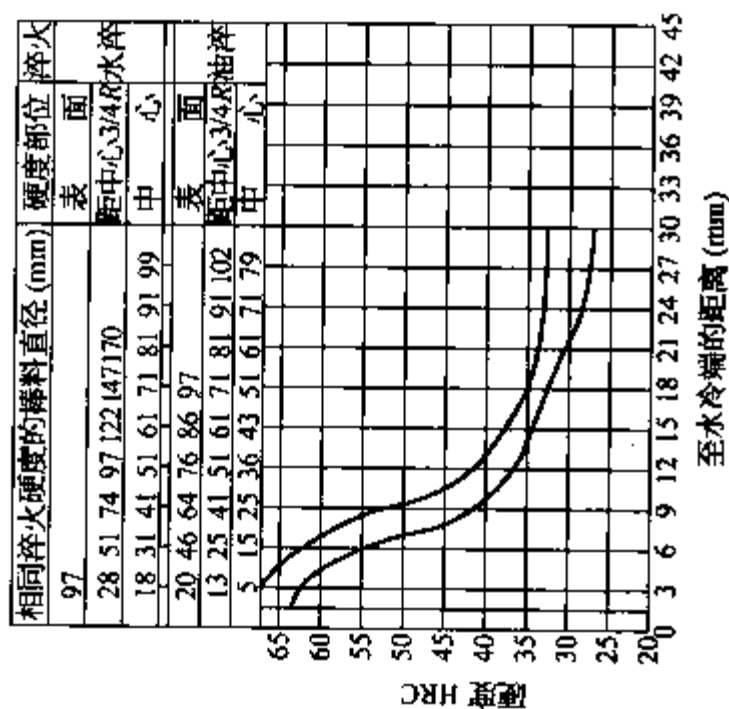


图 6-115 GCr9 钢

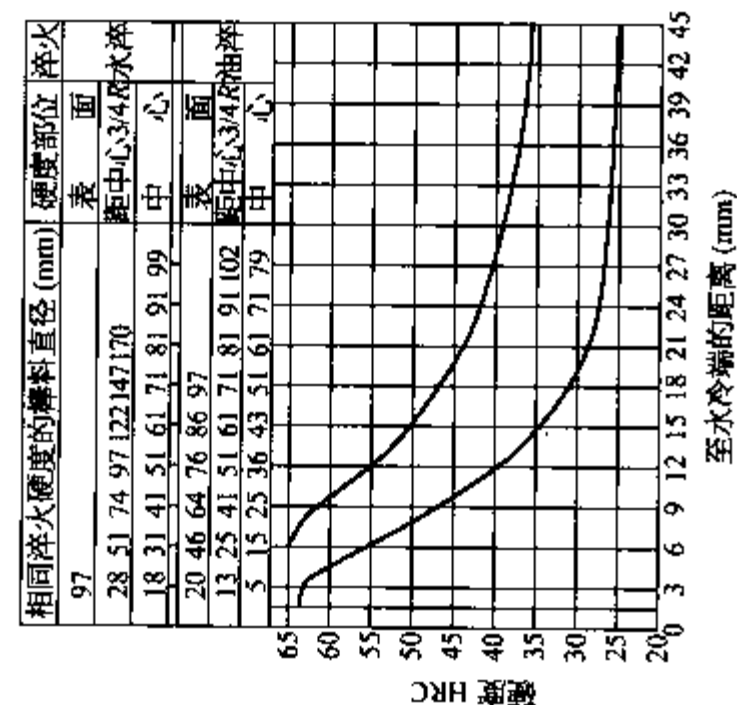


图 6-116 GCr15 钢

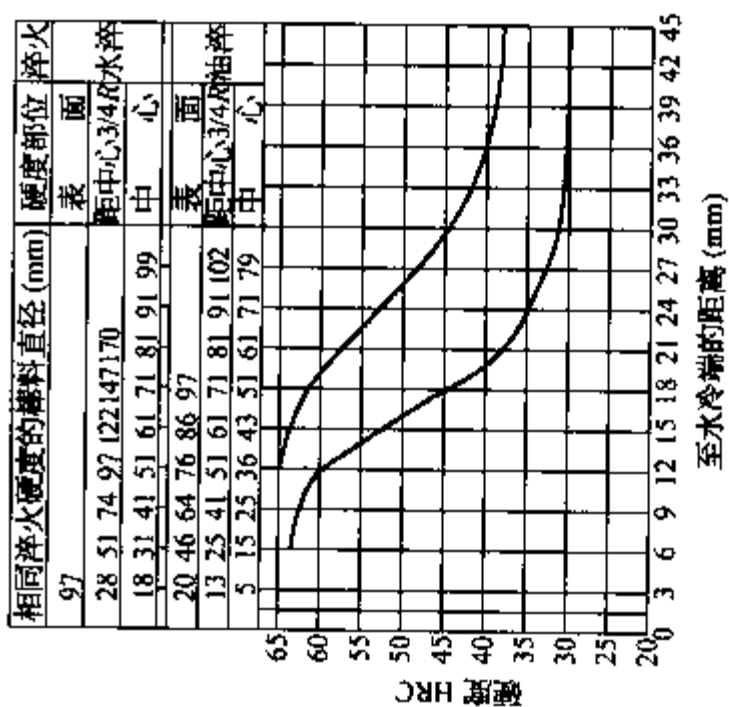


图 6-118 GCr15SiMn 钢

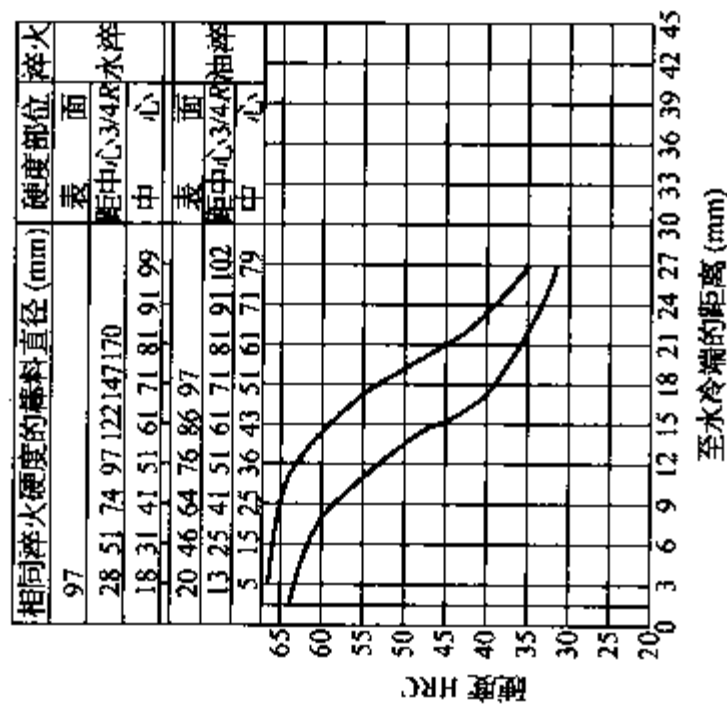


图 6-117 GCr9SiMn 钢

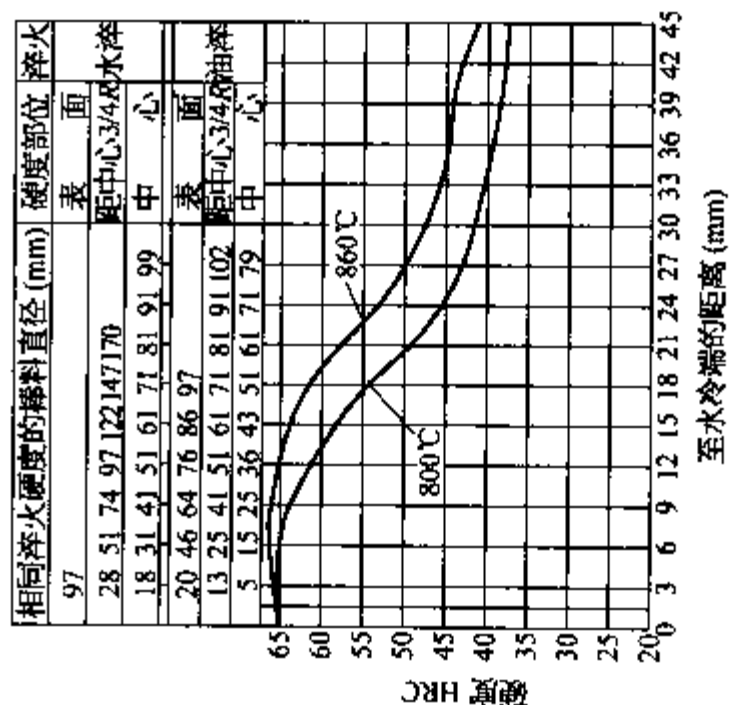


图 6-120 CSiMnMoVRE 钢

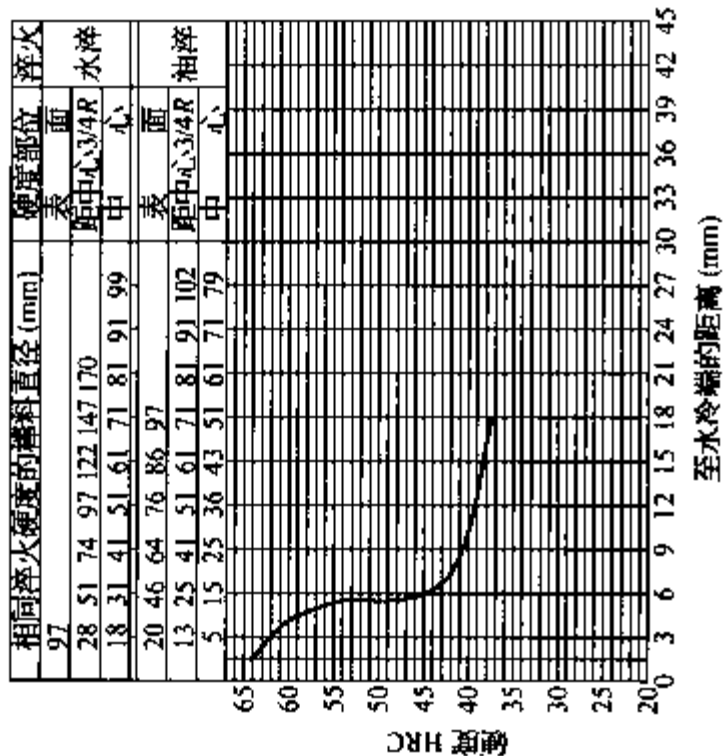


图 6-121 T8 钢

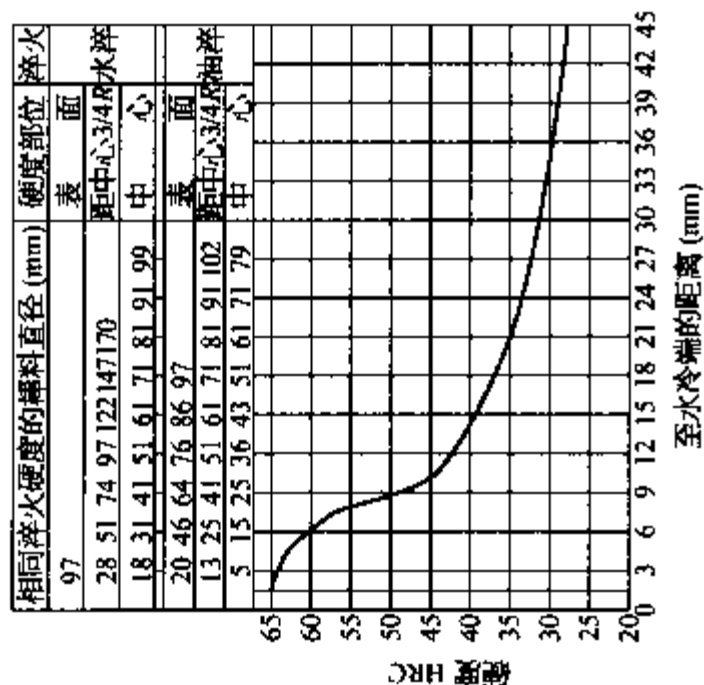


图 6-122 T12 钢

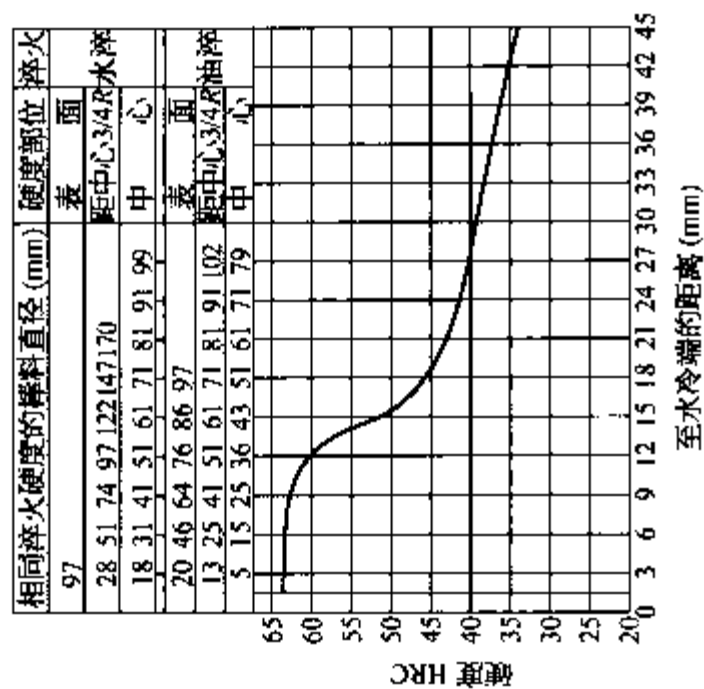


图 6-123 9Mn2V 钢

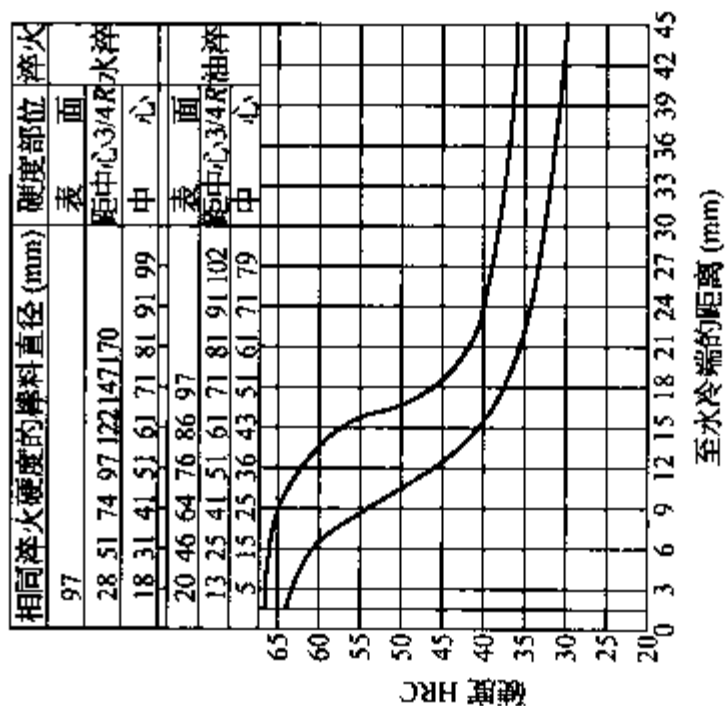


图 6-124 9CrSi 钢

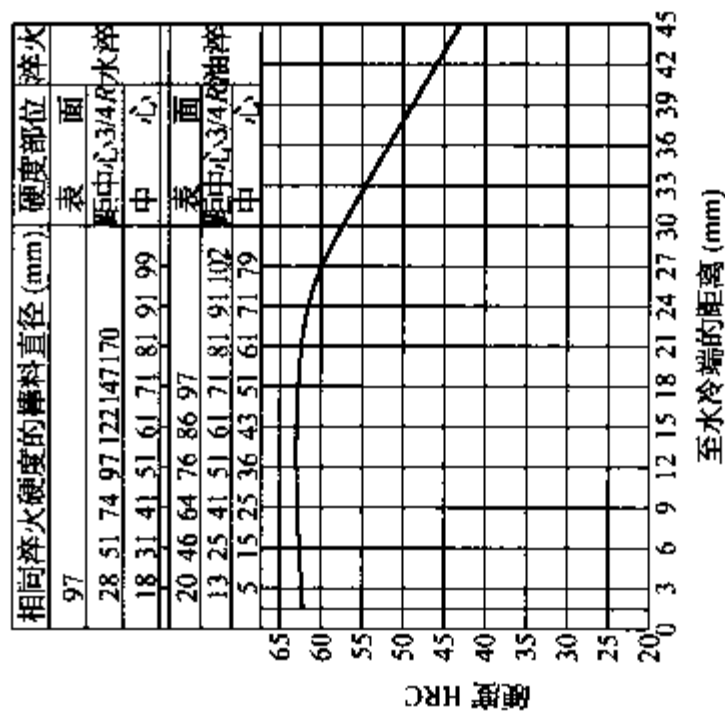


图 6-125 9CrWMn 钢

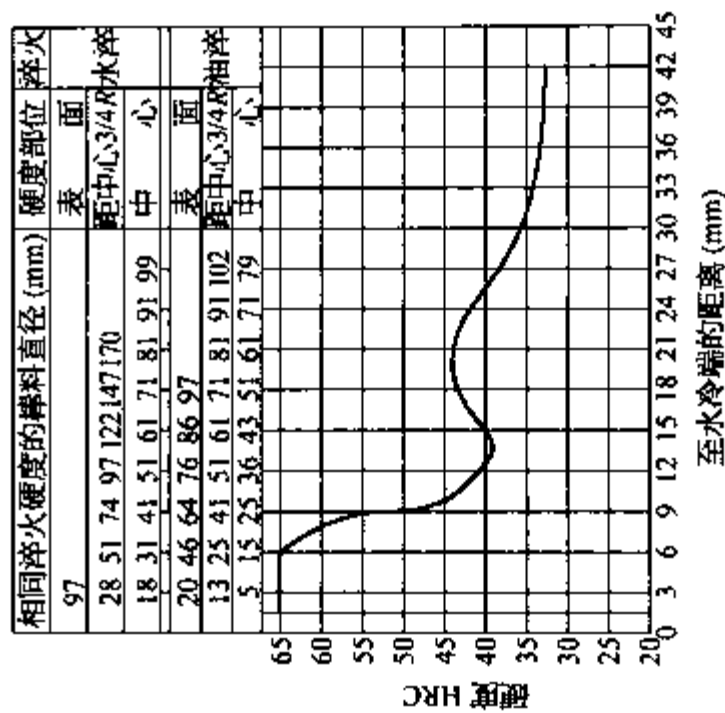


图 6-126 CrV 钢

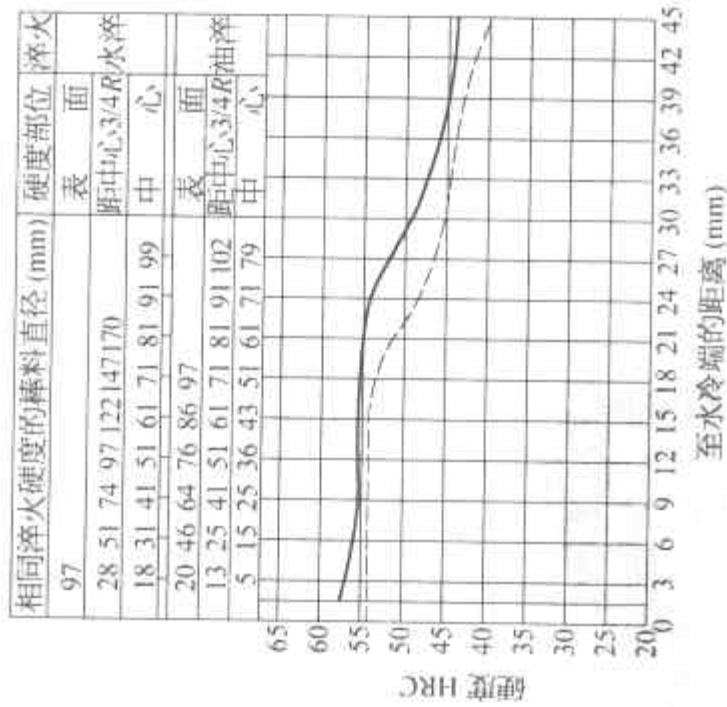


图 6-127 4CrMnMo 钢

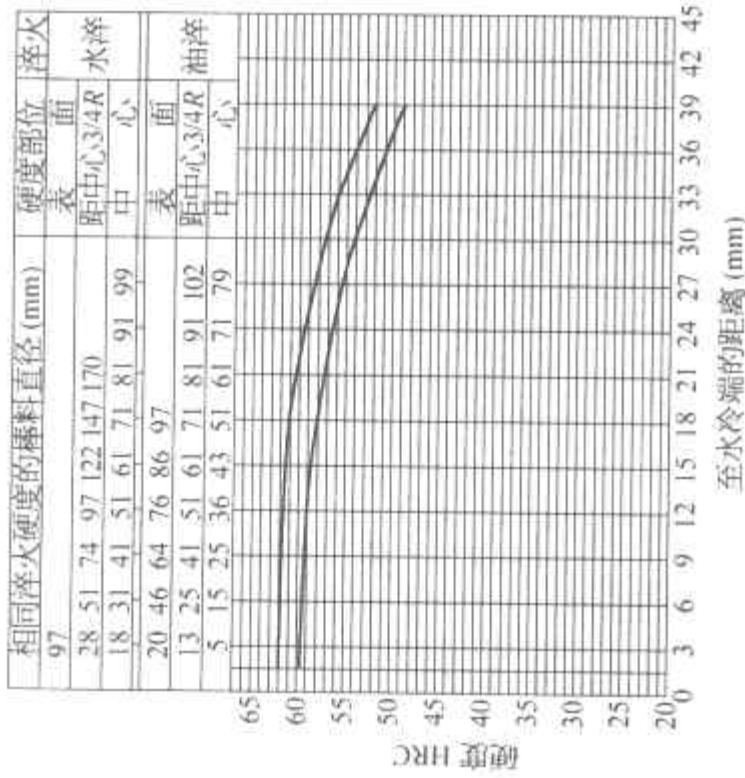


图 6-128 5Cr2W2V 钢

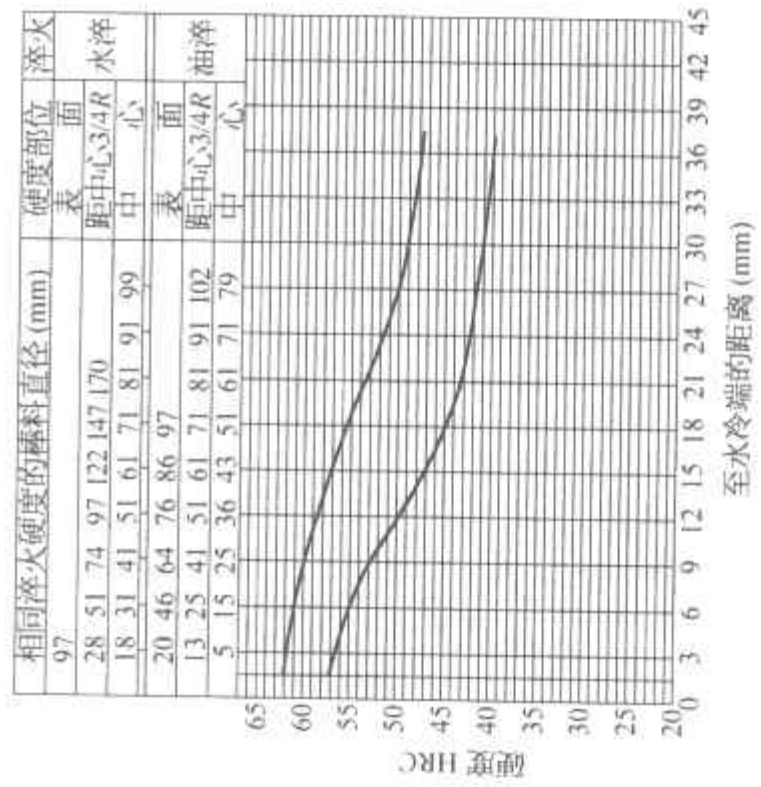


图 6-129 5Si2MnMo1V 钢



### 三、影响淬透性的因素

钢的淬透性决定于钢的临界淬火速度,也就是取决于过冷奥氏体稳定性,因而它受钢本身内部影响,而与外部因素无关。

#### 1. 奥氏体成分

碳和合金元素的影响见图 6-130 和图 6-131。

#### 2. 奥氏体均匀程度

在相同过冷条件下,奥氏体成分越均匀,钢的淬透性越高;淬火加热温度越高,钢的淬透性越高,见图 6-132。

#### 3. 奥氏体晶粒

奥氏体晶粒越粗,淬火临界冷却速度越小,淬透性越高。反之,奥氏体晶粒越细,淬透性越低,见图 6-133 和图 6-134。

特别要提醒的是,奥氏体晶粒粗,淬透性高,但伴随而来的是工件力学性能下降,畸变、开裂倾向增大。

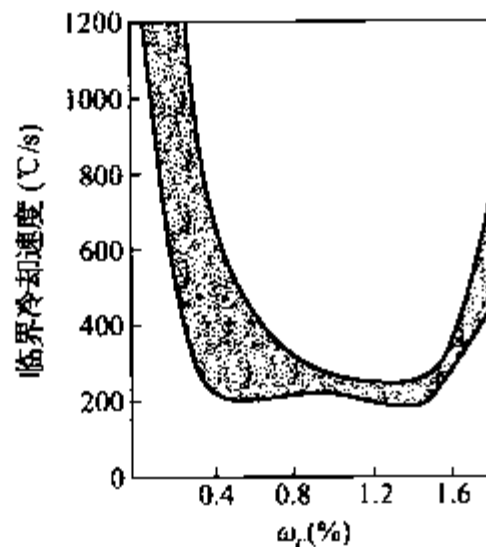


图 6-130 碳素钢的临界冷却速度与碳的质量分数的关系

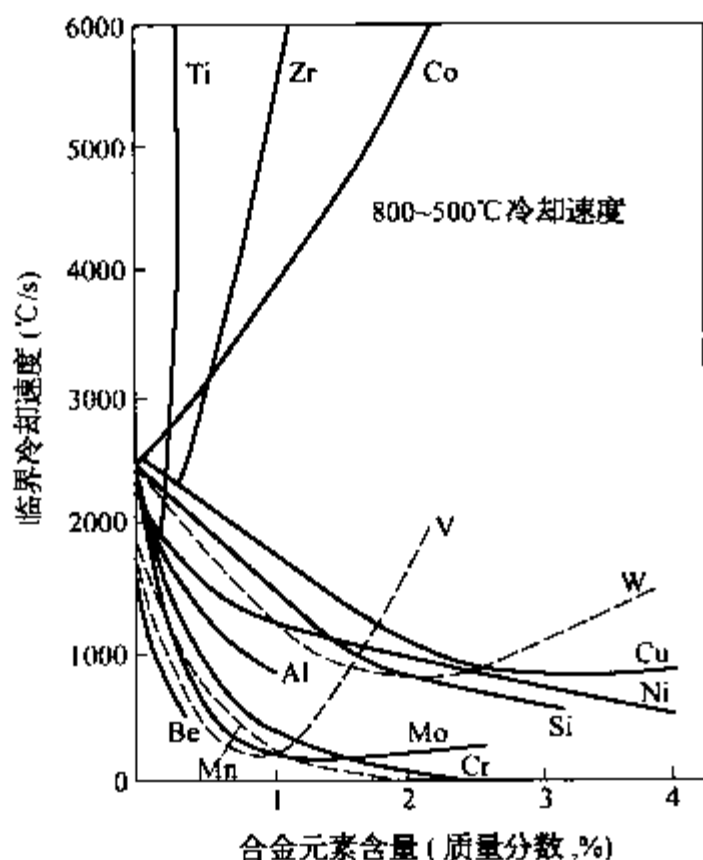


图 6-131  $\omega_c 0.3\%$  钢中合金元素对临界冷却速度的影响

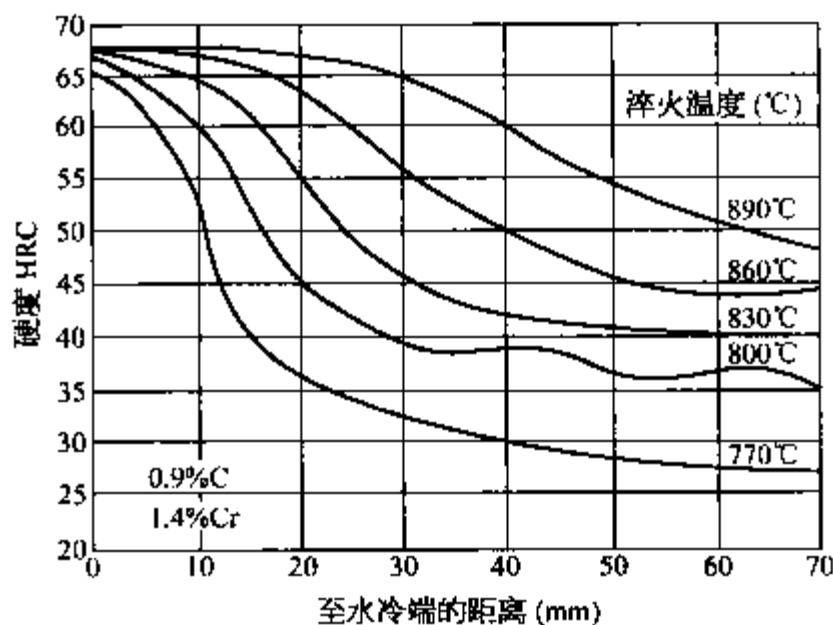


图 6-132 淬火温度对 GCr15 轴承钢淬透性的影响

#### 4. 钢中未溶第二相

钢中未溶入奥氏体的碳化物、氮化物或其他非金属夹杂物均可提高珠光体、贝氏体转变时的成核率,因而会降低其淬透性。其中,以 V、Ti、Nb 等元素的未溶碳化物作用最大。因为这些碳化物未溶,造成奥氏体贫碳,而且阻碍奥氏体晶粒长大,提高了淬火临界冷却速度,降低了淬透性。

#### 5. 钢的原始组织

钢的原始组织中,珠光体类型(片状或粒状)和弥散度,在奥氏体化时会影响奥氏体化速度和程度,从而影响钢的淬透性。其中细片状珠光体溶入奥氏体的速度最快,淬透性也最好。粗粒状珠光体溶入奥氏体的速度最慢,淬透性最差。

表 6-5 综合表示了影响淬透性的主要因素。

表 6-6 是部分钢不同截面尺寸淬火后的硬度值。



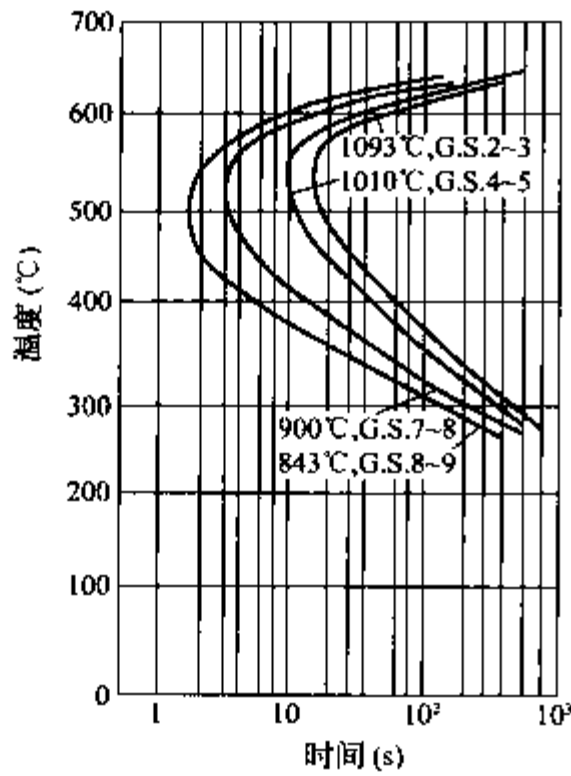


图 6-133 晶粒度对奥氏体转变曲线的影响 (G. S. — 晶粒度)

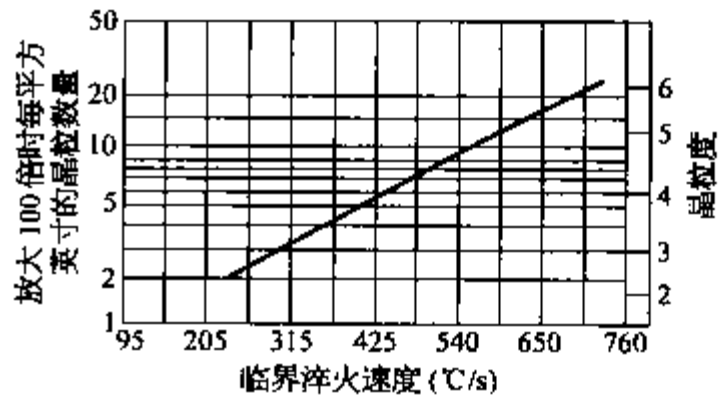


图 6-134 奥氏体晶粒尺度对临界淬火速度的影响

表 6-5 影响淬透性的主要因素

影响因素	临界冷却速度	过冷奥氏体稳定性	C 曲线	淬透性
碳的质量分数增加(亚共析钢)	降低	增大	右移	提高
奥氏体中溶入合金成分(除钴等元素外)	降低	增大	右移	提高
提高奥氏体化温度与其均匀度	降低	增大	右移	提高
奥氏体晶粒度长大	降低	增大	右移	提高
夹杂物与未溶碳化物,阻碍奥氏体晶粒长大	增大	降低	左移	降低
钢的原始组织,呈片状珠光体型	降低	增大	右移	提高

表 6-6 部分钢不同截面尺寸淬火后的硬度 HRC

材料及热处理	截面厚度(mm)						
	≤3	4~10	11~20	21~30	31~50	51~80	81~120
15, 渗碳水淬	58~65	58~65	58~65	58~65	58~62	50~60	
15, 渗碳油淬	58~62	40~60					
35, 水淬	45~50	45~50	45~50	35~45	30~40		
45, 水淬	54~59	50~58	50~55	48~52	45~50	40~45	25~35
45, 油淬	40~45	30~35					
T8, 水淬	60~65	60~65	60~65	60~65	56~62	50~55	40~45
T8, 油淬	55~62						
20Cr, 渗碳油淬	60~65	60~65	60~65	60~65	56~62	45~55	
40Cr, 油淬	50~60	50~55	50~55	45~50	40~45	35~40	
35SiMn, 油淬	48~53	48~53	48~53	45~50	40~45	35~40	
65SiMn, 油淬	58~64	58~64	50~60	48~55	45~50	40~45	35~40
GCr15, 油淬	60~64	60~64	60~64	58~63	52~62	48~50	
CrWMn, 油淬	60~65	60~65	60~65	60~64	58~63	56~62	56~60

### 第三节 淬火冷却烈度和淬透层深度

#### 一、淬火冷却烈度

淬火冷却烈度是介质冷却能力的标准化指标,以  $H$  表示,其计算公式如下:

$$H = \frac{K}{\lambda}$$

式中  $H$ ——冷却烈度( $\text{cm}^{-1}$ );

$K$ ——热交换系数[ $\text{cal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ ];

$\lambda$ ——热导率[ $\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$ ].

钢在各种常用淬火介质中的冷却速度和冷却烈度见表 6-7。对工业用钢来讲,热导率基本是一个定值,因此冷却烈度  $H$  值主要取决于钢与冷却介质之间的热交换情况。当冷却介质搅动或提高流速时,那么钢件的热量带走得快(热交换过程快), $H$  升高,见表 6-8 及图 6-135。

表 6-7 钢在各种常用淬火介质中的冷却速度和冷却烈度

淬 火 剂	在下列温度区间内的冷却速度( $^\circ\text{C}/\text{min}$ )		以 $18^\circ\text{C}$ 水为标准的相对冷却烈度 $H(\text{cm}^{-1})$	
	$650\sim 550^\circ\text{C}$	$300\sim 200^\circ\text{C}$	$650\sim 550^\circ\text{C}$	$300\sim 200^\circ\text{C}$
$18^\circ\text{C}$ 的 10%苛性钠水溶液	1 200	300	2	1.10
$18^\circ\text{C}$ 的 10%食盐水溶液	1 100	300	1.83	1.10
$18^\circ\text{C}$ 的 10%苏打水溶液	800	270	1.33	1.00
$18^\circ\text{C}$ 的 10%硫酸水溶液	750	300	1.25	1.10
$0^\circ\text{C}$ 的水	—	—	1.06	1.02
$18^\circ\text{C}$ 的水	600	270	1	1
$26^\circ\text{C}$ 的水	500	270	0.84	1.00
$50^\circ\text{C}$ 的菜子油	200	35	0.33	0.13
$50^\circ\text{C}$ 的矿物机械油	150	30	0.25	0.11
$50^\circ\text{C}$ 的变压器油	120	25	0.20	0.09
$50^\circ\text{C}$ 水	100	270	0.17	1.00
10%油在水中的乳浊液	70	200	0.12	0.74
肥皂水	30	200	0.05	0.74
$74^\circ\text{C}$ 水	30	200	0.05	0.74
$100^\circ\text{C}$ 水	—	—	0.044	0.71
空气(静止的)	—	—	0.028	0.007
真空	—	—	0.011	0.004

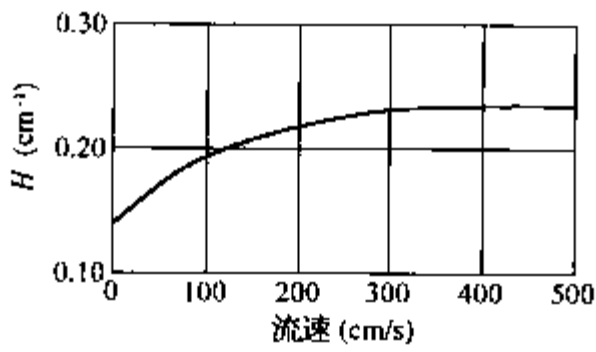


图 6-135 淬火油的流速对冷却烈度的影响

表 6-8 搅动条件对冷却烈度的影响

搅动程度	冷却烈度 $H(\text{cm}^{-1})$			
	空气	油	水	食盐水
静止	0.02	0.25~0.30	0.9~1.0	2
轻微搅动	—	0.30~0.35	1.0~1.1	2~2.2
缓慢搅动	—	0.35~0.40	1.2~1.3	—
中等搅动	—	0.4~0.5	1.4~1.5	—
强烈搅动	0.05	0.5~0.8	1.6~2.0	—
激烈搅动	—	0.8~1.1	4	5
端淬喷水	—	—	2.5	—

## 二、淬透层深度

钢的淬透层深度,也称淬硬层厚度,是对钢件的实际淬硬(深度)的能力的一种反映。

淬透层深度和淬透性虽然有密切关系,但两者不能完全等同。淬透性是在规定条件下作出的钢材固有的属性,而淬透层深度受到许多因素的影响;如钢淬透性、钢冷却的临界冷却速度、冷却介质冷速快慢、钢件大小和尺寸、搅动、流速、循环冷却条件的优劣、钢件加热冷却的装夹方式等诸多因素。图 6-136 是工件截面各点冷却速度的示意图。图 6-137 是临界冷却速度与淬透层深度的关系:临界冷却速度愈大的钢,所获得的淬透层深度也就愈浅。图 6-138 是淬火时的理想冷却曲线示意图。

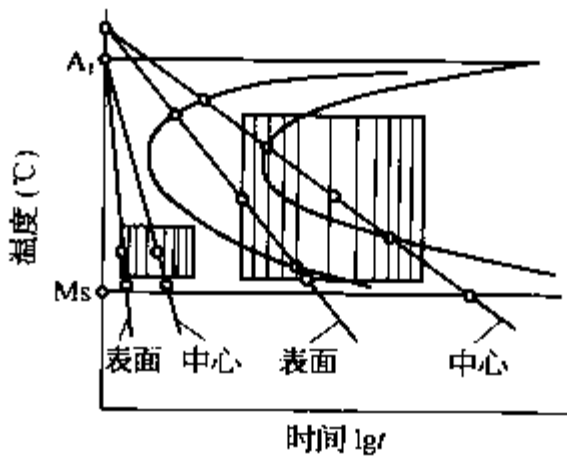


图 6-136 由奥氏体转变曲线说明截面各点的冷却速度示意图

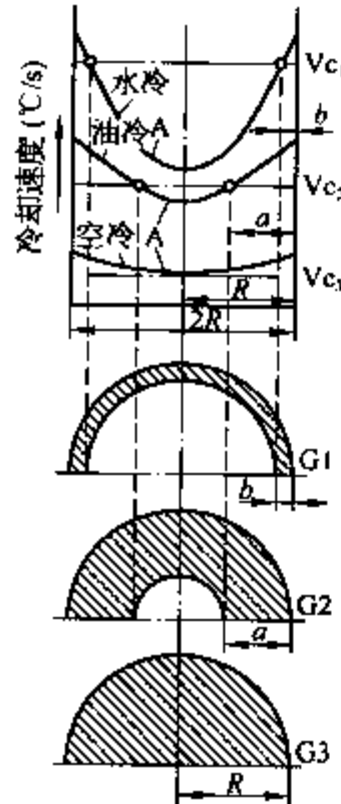


图 6-137 淬透性与临界冷却速度的关系

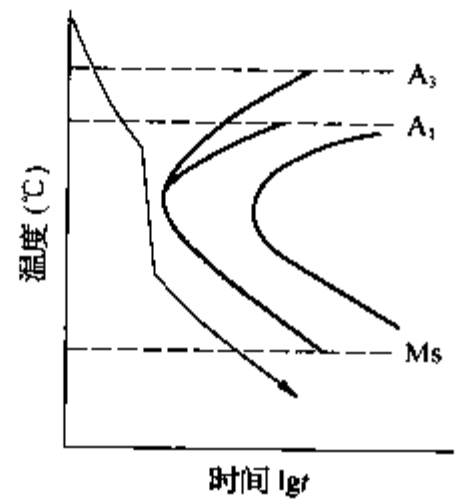


图 6-138 淬火时的理想冷却曲线示意图

## 三、临界冷却直径及端淬曲线的估算

早期已有根据钢的化学成分、奥氏体晶粒度来计算理想临界直径  $d_c$  或绘制端淬曲线,近期又建立了材料成分与性能之间的数学模型。现可应用计算机进行辅助成分设计与选材或预测性能。

1. 根据化学成分计算理想临界直径  $d_{ic}$

本方法是建立在奥氏体的化学成分及其晶粒度的基础上,假设合金元素均在奥氏体中充分扩散均匀、碳化物全部溶于奥氏体中,计算方法有相乘法、相加法等。现介绍相乘法:

$$d_{ic} = D_{ic} \times F_{Mn} \times F_{Cr} \times F_{Ni} \times \dots$$

式中  $d_{ic}$ ——理想临界直径;

$D_{ic}$ ——用碳的质量分数及奥氏体晶粒度求出Fe-C合金的基本淬透性,见图6-139;

$F_{Mn}, F_{Cr}, \dots$ ——各种元素的淬透性系数,见图6-140或由表6-9查得。

此算法未考虑奥氏体温度的变化,也未考虑合金元素共存时相互影响的效应。计算结果有一定的误差,需进一步修正。

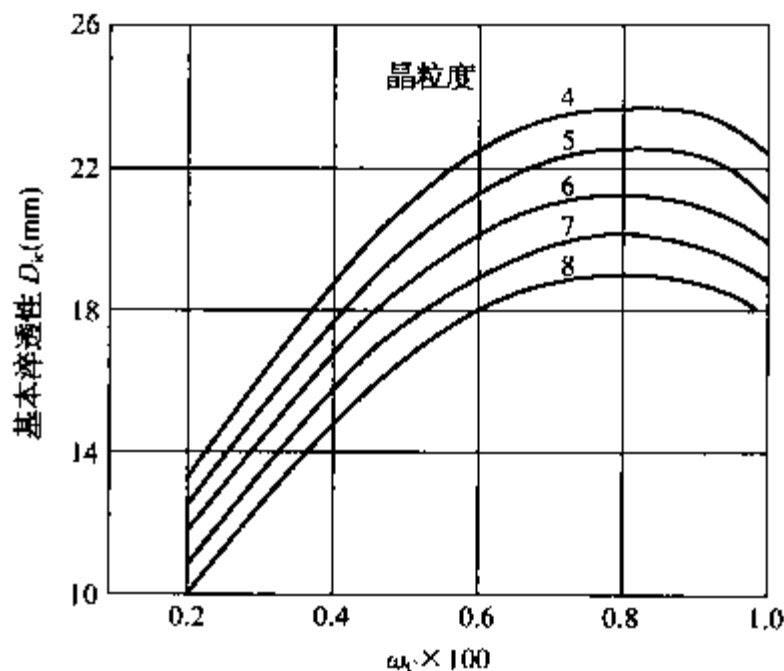


图 6-139 碳的质量分数与基本淬透性  $D_{ic}$  的关系  
(曲线上数字表示不同奥氏体晶粒度)

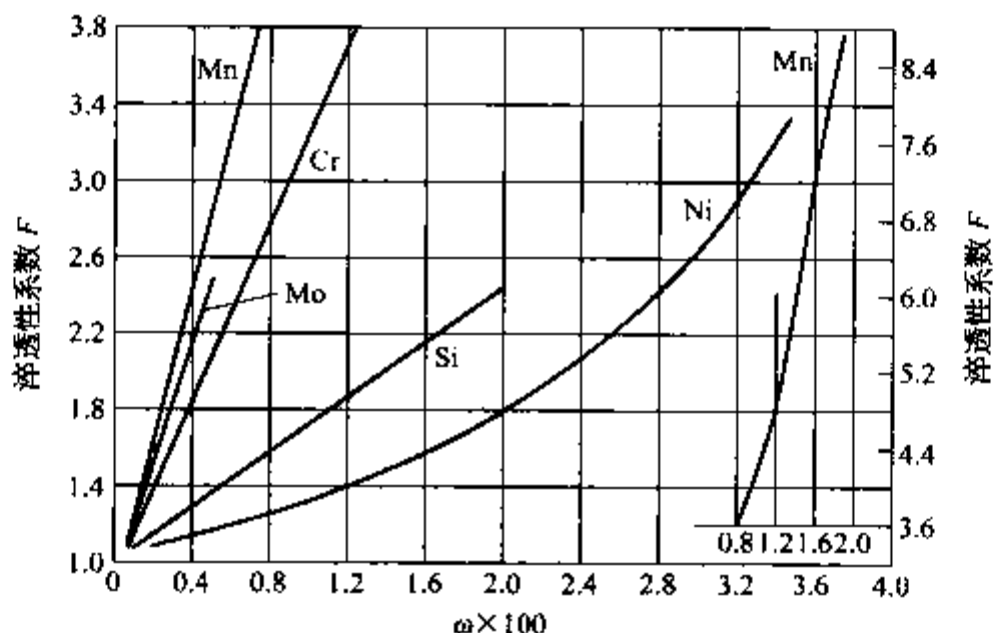


图 6-140 不同合金元素的淬透性系数

表 6-9 各元素的淬透性系数

$\omega_c$ (%)	$D_{ic}$		淬透性系数 $F$				
	晶粒号 5	晶粒号 8	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
0.05	0.088	0.069	1.167	1.035	1.018	1.108 64	1.15
0.10	0.126	0.101	1.333	0.070	1.036	1.216 0	1.30
0.15	0.153	0.121	1.500	1.105	1.055	1.324 0	1.45
0.20	0.176	0.140	1.677	1.140	1.073	1.432 0	1.60
0.25	0.198	0.156	1.833	1.175	1.091	1.540	1.75
0.30	0.217	0.170	2.000	1.210	1.109	1.648	1.90
0.35	0.234	0.185	2.167	1.245	1.128	1.756	2.05
0.40	0.250	0.197	2.333	1.280	1.146	1.864	2.20
0.45	0.266	0.209	2.500	1.315	1.164	1.972	2.35
0.50	0.280	0.220	2.667	1.350	1.182	2.080	2.50

(续表)

$\omega_C$ (%)	$D_{ic}$		淬透性系数 $F$					Mo
	晶粒号 5	晶粒号 8	Mn	Si	Ni	Cr		
0.60	0.316	0.241	3.000	1.420	1.219	2.296		
0.70	0.334	0.260	3.333	1.490	1.255	2.512		
0.80	0.356	0.278	3.667	1.560	1.291	2.728		
0.90	0.375	0.296	4.000	1.630	1.321	2.944		
7.00			4.333	1.700	1.364	3.160		
1.20			5.000	1.840	1.427	3.592		
1.40			6.020	1.980	1.509	4.024		
1.60			7.040	2.120	1.595	4.456		
1.80			8.060	2.260	1.680			
2.00				2.400	1.779			
2.50					2.078			
3.00					2.545			
3.50					3.260			

$$\text{系数} = \omega_{Mo} \times 3 + 1.00$$

2. 由  $d_{ic}$  及冷却介质  $H$  值求各介质冷却的  $d_c$  (图 6-141)

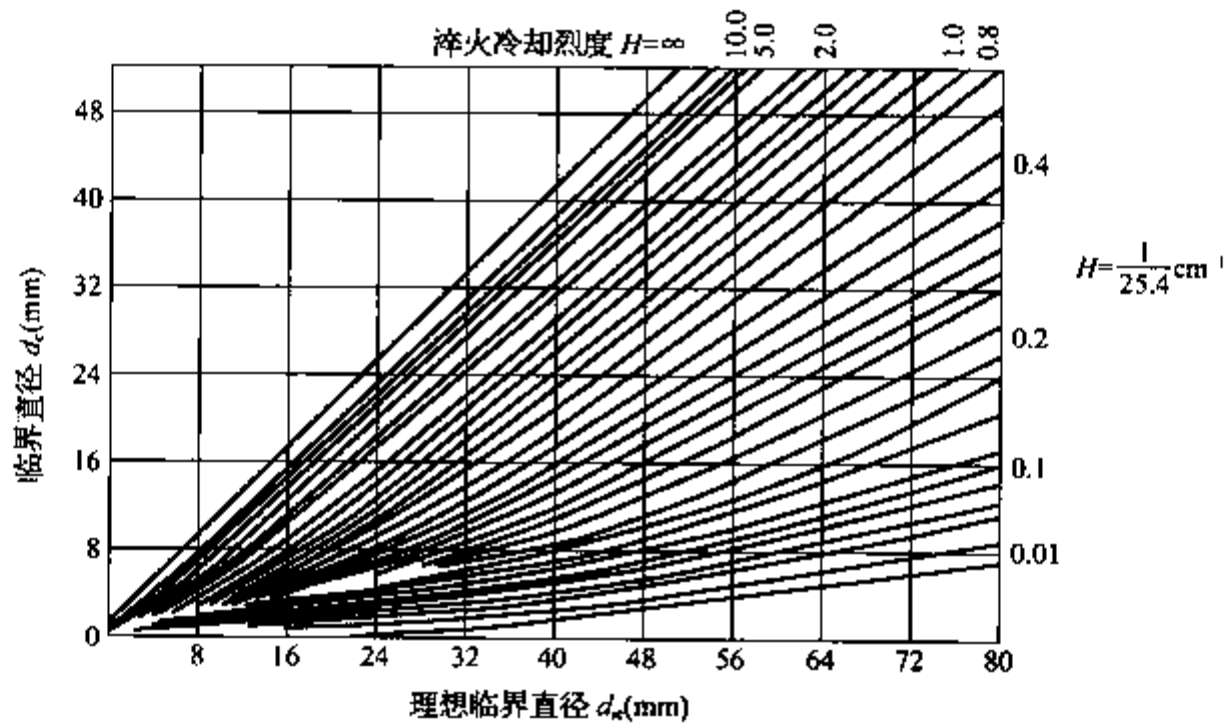


图 6-141  $d_k-H-d_c$  关系图

3. 根据化学成分计算端淬曲线

合金元素在距离顶端 10 mm 以内对淬透性影响较明显, 大于 10 mm 后其影响趋于一个常数。假设在端淬距离为零时, 所有合金元素在顶端处的淬透性系数为零, 即在该处的硬度完全由碳所控制, 则其端淬曲线计算公式:

$$\{J_0\}_{HRC} = 60 \times \sqrt{\omega_C \times 100} + 20HRC \quad (\text{适用于 } \omega_C = 0.1\% \sim 0.6\% \text{ 的钢})$$

距顶端 4~40 mm 处硬度值的数值方程为:

$$\begin{aligned} \{J_{4-40}\}_{HRC} = & 88 \sqrt{\omega_C \times 100} - 0.0135E^2 \sqrt{\omega_C \times 100} + 19 \sqrt{\omega_{Cr} \times 100} + 6.3 \sqrt{\omega_{Ni} \times 100} \\ & + 16 \sqrt{\omega_{Mn} \times 100} + 35 \sqrt{\omega_{Mo} \times 100} + 5 \sqrt{\omega_{Si} \times 100} - 0.82K - 20 \sqrt{E} + 2.11E - 2HRC \end{aligned}$$

式中  $E$ ——到顶端距离(mm);

$K$ ——奥氏体晶粒度。

上述用于  $\omega_C < 0.6\%$ 、 $\omega_{Cr} < 2\%$ 、 $\omega_{Mn} < 2\%$ 、 $\omega_{Ni} < 9\%$ 、 $\omega_{Si} < 0.4\%$ 、 $\omega_{Mo} < 5\%$ 、 $\omega_{V} < 0.2\%$ ，奥氏体晶粒度  $K=1.5\sim 11$  级的钢。

## 第四节 淬火冷却介质的选择与检测

### 一、淬火冷却介质的分类与选择原则

#### 1. 淬火冷却介质分类

可用于淬火冷却的介质有很多(表 6-10)，按照冷却过程中物态的变化可分成有物态变化和无物态变化两类(表 6-11)。

表 6-10 淬火冷却介质种类

液 体	水	清水,无机盐、碱水溶液,有机聚合物水溶液
	油	植物油,全损耗系统用油(机械油),专用商品淬火油(矿物油+添加剂)
	熔融热浴	熔盐,熔融金属
气 体	空 气	静止空气,压缩空气
	还原性气体( $H_2$ ),中性气体( $N_2$ ),惰性气体(Ar、He 等)	
固 体	流态床	气、固态,气、液/固态
	金属板	

表 6-11 按物态变化区分的淬火冷却介质

有物态变化的淬火介质(介质的沸点低于工件的淬火温度)	水及各种水的溶液,各种类型的淬火油
无物态变化的淬火介质(介质的沸点高于工件的淬火温度)	各种气体,熔融状金属、熔盐,固体(如铜板、铁板)、气-固态流态床

#### 2. 淬火冷却介质选择原则

选择淬火冷却介质时主要考虑的是材料的临界冷却速度。可根据钢的半马氏体端淬距离确定临界冷却速度(图 6-142),此外还可根据钢种、工件大小或截面尺寸、热处理工艺类型、技术要求、冶金质量及设备类型来选择适当的淬火介质(表 6-12)。表 6-13 是淬火冷却介质一般技术要求和应用范围。

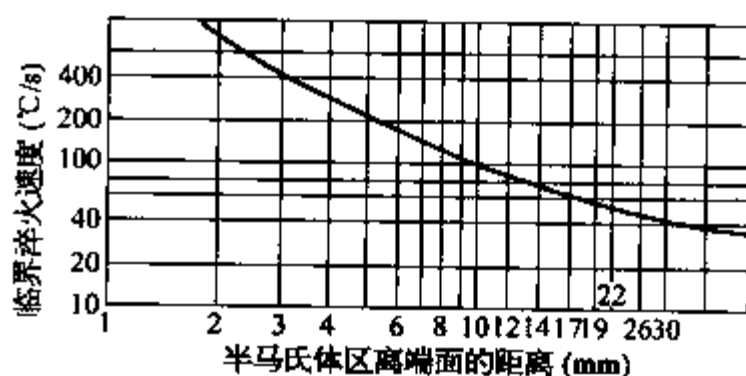


图 6-142 根据已知的半马氏体端淬距离确定临界冷却速度

表 6-12 淬火冷却介质的选择原则

项 目	选 择 原 则
钢的化学成分	低淬透性钢选择冷却能力强的淬火介质(如水、盐水或碱水、有机聚合物水溶液 <sup>①</sup> );高淬透性钢选择冷却缓慢的淬火介质(如油、某些聚合物水溶液)
工件大小及复杂程度	质量或截面尺寸越大,则选择冷却能力越强的淬火介质;形状不对称或截面相差悬殊的,则要选择冷却相对缓慢的淬火介质

(续表)

项 目	选 择 原 则
工艺类型及技术要求	<p>整体调质只要能满足技术(力学性能、畸变)要求的,一般尽可能选择较缓慢的冷却介质(如油);力学性能要求较高或工件较大,则选择冷却能力较强的冷却介质,如聚合物水溶液、水,甚至盐水等。</p> <p>感应淬火一般应选择聚合物水溶液或水淬;在满足安全的前提下也可采用浸油冷却,但应注意淬火油的闪点大小。</p> <p>渗碳、碳氮共渗(或其他化学热处理)一般选择油淬;某些畸变要求较高的零件,如汽车、摩托车齿轮,则应选择热油(或分级淬火油)淬火。高浓度聚合物水溶液在某些情况下也可用于一般工件的渗碳、碳氮共渗</p>
设备类型	保护气氛连续炉、密封箱式多用炉等设备,一般应选择油淬;井式炉或气氛控制要求不高的网带炉、辊棒炉、铸链板式炉等设备,既可油淬也可选择聚合物水溶液;真空炉可以油淬或高压气淬
其 他	在满足使用要求和质量的前提下,应选择性能稳定、消耗量少、环境界面友好的淬火介质。如用聚合物水溶液代替双液淬火用于碳钢、工具钢或合金钢的调质处理;或用具有更高闪点的热油代替硝盐浴、碱浴用于等温或分级淬火

注:① 本篇中的有机聚合物水溶液均简称为聚合物水溶液。

表 6-13 淬火冷却介质一般技术要求和应用范围(JB/T6955—1993)

淬 火 介 质	一 般 技 术 要 求	应 用 范 围	
第一类 介质: 水及水溶液	水	清洁、流动(或循环、搅拌),水温 20~40℃	碳素结构钢,碳素工具钢,不锈钢,钛合金,铝合金,铜合金
	无机物水溶液	按要求选择浓度,常用浓度 5%~15%,高浓度为 20%(饱和浓度)。液温 20~45℃,循环或搅拌,pH 6.5~8.5	碳素结构钢,合金结构钢,碳素工具钢
	聚合物水溶液	低浓度、中浓度、高浓度(视要求而定),液温 20~50℃,循环或搅拌,pH 6.5~8.5(或按规定)	碳素结构钢,碳素工具钢,合金工具钢,轴承钢,弹簧钢,合金结构钢,铝合金
第二类 介质: 油	机械油	常规油温 20~80℃,热油大于 100℃,循环或搅拌	碳素结构钢(截面小于 5 mm),合金结构钢,合金工具钢,轴承钢,弹簧钢,高速钢
	专用淬火油	按工艺要求选择(快速、光亮、等温、真空),油温应低于闪点 80~100℃	
第三类 介质: 热浴	盐浴	使用温度允许波动范围±20℃,按要求的浴温选择配方,硝盐浴氯离子≤0.3%,硫酸根≤0.5%,pH 6.5~8.5	含碳量≥0.45%的碳素结构钢,碳素工具钢,高速钢,合金结构钢,合金工具钢
	碱浴	使用温度允许波动范围±10℃,按要求的浴温选择配方,碳酸根≤4%	

## 二、淬火冷却介质的性能和质量评判

不同的淬火介质表现出不同的冷却特性和冷却能力。一般而言,淬火油的冷速取决于分子量、黏度和易挥发的组分,不同的冷速和高温稳定性对应着不同类型的淬火油。聚合物水溶性淬火液依分子量大小、链长范围和聚合物种类、浓度等的不同,冷却性能差异较大。表 6-14 是评价冷却介质质量的主要参考因素。

评价淬火冷却介质冷却性能应用最广泛的是基于 ISO9950 标准的冷却曲线法,这种方法相对比较直观,与实际淬火之间的关联性较强,能够完整地描述出淬火过程中的各个阶段的冷却性能、冷却速度,并且可以显示出老化或污染对介质冷却性能造成的影响,同时操作简单、测试精度高。

表 6-14 冷却介质质量评判的主要因素

冷却介质类型	理化指标	冷却性能指标
油	外观、运动黏度、密度、闪点及燃点、水分、酸值、油泥、皂化值、中和值等	高温区及低温区冷速大小、最大冷速及对应的温度、特性点温度
聚合物水溶液	外观、运动黏度、密度、细菌和 pH 值等	
盐浴/碱浴	氯离子、碳酸根、硫酸根、水含量及不溶物含量、pH 值及成分变化等	—

### 三、淬火冷却介质的检测方法

采用不同材料的探头所测试出的淬火冷却介质性能有很大的不同,主要的区别见表 6-15。目前运用较多的是参照 ISO9950—1995《测定工业淬火油冷却性能的镍合金探头实验方法》的镍合金探头法。瑞典的生产与工程研究所按此标准推出了相应的检测仪器——IVF 仪。

表 6-15 几种不同检测方法的比较

	GM 秒法	H 值法(Grossmann 法)	IVF 仪法
简 述	取决于 7/8" 镍球从 370℃ 冷却到 350℃ 的时间。与硬度有一定的对应关系,但与变形无直接联系	特定介质在 705℃ 时的冷却速度与静止的水进行比较	淬火全过程的理解和分析。带热电偶的、可采集温度与时间数据的仪器。不同的技术规范、不同的探头
检测范围及标准	慢速油 15~20 s 常规油 11~14 s 快速油 8~10 s 等温油 18~25 s	有搅拌下: 水(32℃) 1.0~2.8 水(55℃) 0.2~2.4 空气 0.05~0.08 常规油 0.2~0.8 快速油 0.5~1.5	ISO9950、JIS K2242、ASTM D 6600。银探头(日本、法国), IVF 探头(最常用), Tensi 探头

法国、日本也制定了各自的检测标准,但探头所采用的材料不同,由此带来的区别则表现在导热性差异和测试条件的不同。表 6-16 是 ISO9950 标准测试的主要项目,探头的主要区别见表 6-17。ISO9950 标准的探头见图 6-143,典型的淬火介质冷却曲线见图 6-144。

表 6-16 ISO9950 标准主要检测项目

标准号	ISO9950
检测条件	① 探头温度: 850℃; ② 液体槽: 2 000 mL, 60℃, 静止
检测项目	① 最大冷却速度 $v_{max}$ ; ② 最大冷速所对应的温度; ③ 300℃ 冷速; ④ 850℃→600℃ 的时间; ⑤ 850℃→400℃ 的时间; ⑥ 850℃→200℃ 的时间

表 6-17 不同冷却介质性能检测所用探头的主要区别

标准号	探 头
ISO9950	Drayton 探头: $\phi 12.5 \times 60$ mm 的 Inconel 600 镍-铬合金, 中心热电偶
JIS K2242(日本)	$\phi 10 \times 30$ mm 的圆柱形银探头, 表面热电偶
NFT60178(法国)	SEM-51 探头: $\phi 16 \times 48$ mm 的圆柱形银探头, $\phi 1$ mm 的几何中心 K 型热电偶
JB/T7951	$\phi 16 \times 48$ mm 的圆柱形银探头, $\phi 0.5$ mm 的几何中心 K 型热电偶
ZB E 45003	$\phi 10 \times 30$ mm 的圆柱形银探头, 几何中心热电偶
其 他	LISCIC-NANMAC 探头: $\phi 50 \times 200$ mm 的 AISI 304 圆柱形探头, 分别于表面、离表面 1.5 mm 及几何中心处三个热电偶



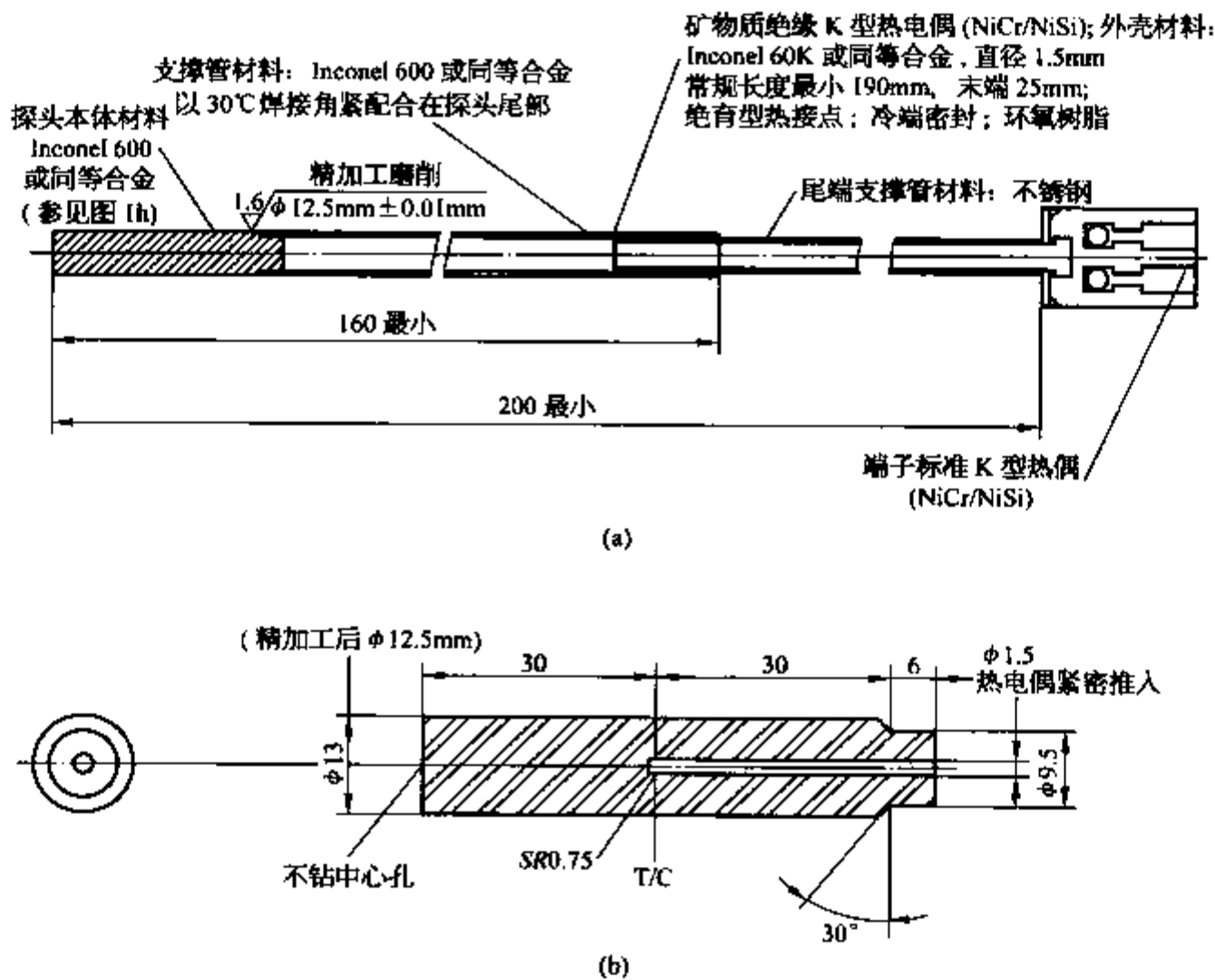


图 6-143 Inconel 600 合金探头  
(a) 总装配图; (b) 探头简图

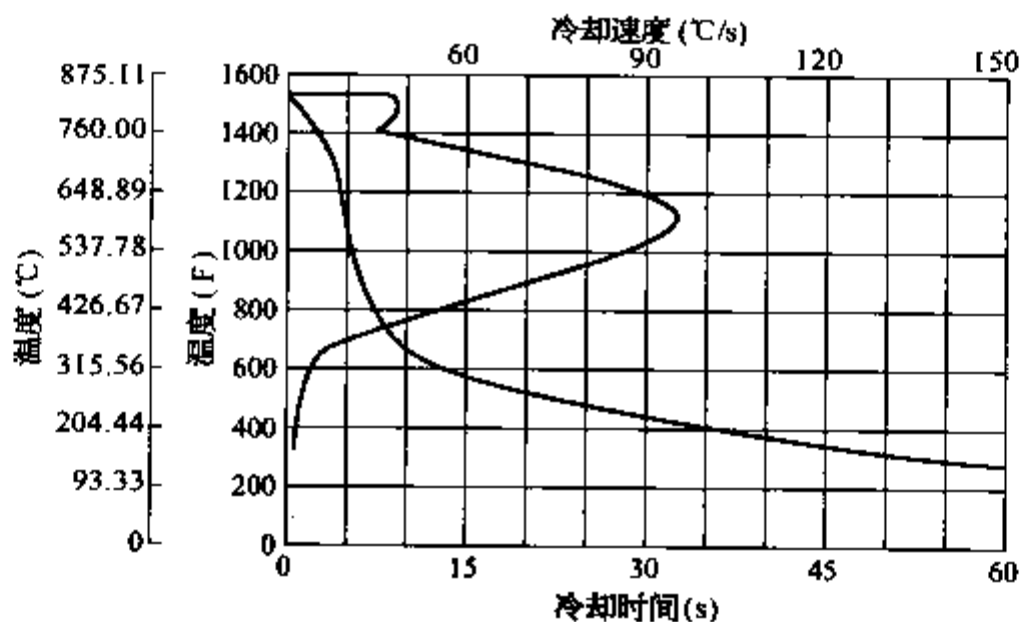


图 6-144 典型的冷却速度曲线

## 第五节 油冷却介质

目前实际生产中使用的淬火油可分为一般淬火油和专用淬火油。一般淬火油较多采用全系统损耗用油，以“L-AN+数字”表示，数字表示油的黏度值，有时用简称：“N+数字”表示，如 N32 等。此外，也有采用轻柴油等其他油。而专用淬火油是选用经多次精炼的基础油，加上特殊的复合添加剂所组成的淬火油。

### 一、一般淬火油

全系统损耗用油(俗称机械油)实际上属于矿物润滑油,因其具有较高的闪点,来源广、黏度变动幅度大,故常用作淬火冷却介质。GB443—1989 按照油的黏度不同将油分成 10 种牌号,其技术性能指标见表 6-18,冷却曲线见图 6-145。有时可将不同的全系统损耗用油混合使用,常将 50%L-AN15+50%L-AN32(质量分数)混合,混合后的主要技术性能指标见表 6-19,混合后测得的冷却速度见图 6-146。

表 6-18 全系统损耗用油(机械油)技术性能指标

项 目 品 种	质 量 指 标										实 验 方 法
	L-AN										
黏度等级(按 GB3141)	5	7	10	15	22	32	46	68	100	150	—
运动黏度(40℃)(mm <sup>2</sup> /s)	4.14~ 5.06	6.12~ 7.48	9.00~ 11.00	13.5~ 16.5	19.8~ 24.2	28.8~ 35.2	41.4~ 50.6	61.2~ 74.8	90.0~ 110	135~ 165	GB265
倾点①(℃) 不高于	-5										GB3535
水溶性酸和碱	无										GB259
中和值(mgKOH/g)	报告										GB4945
机械杂质(质量分数,%) 不大于	无			0.005			0.007				GB511
水分(质量分数,%) 不大于	痕迹										GB260
闪点(开口)(℃) 不低于	80	110	130	150			160	180		GB3536	
色度(号) 不大于	2				2.5		报告				GB6540

注:① 当本产品用于寒区时,其倾点指标可由供需双方协商后另定。

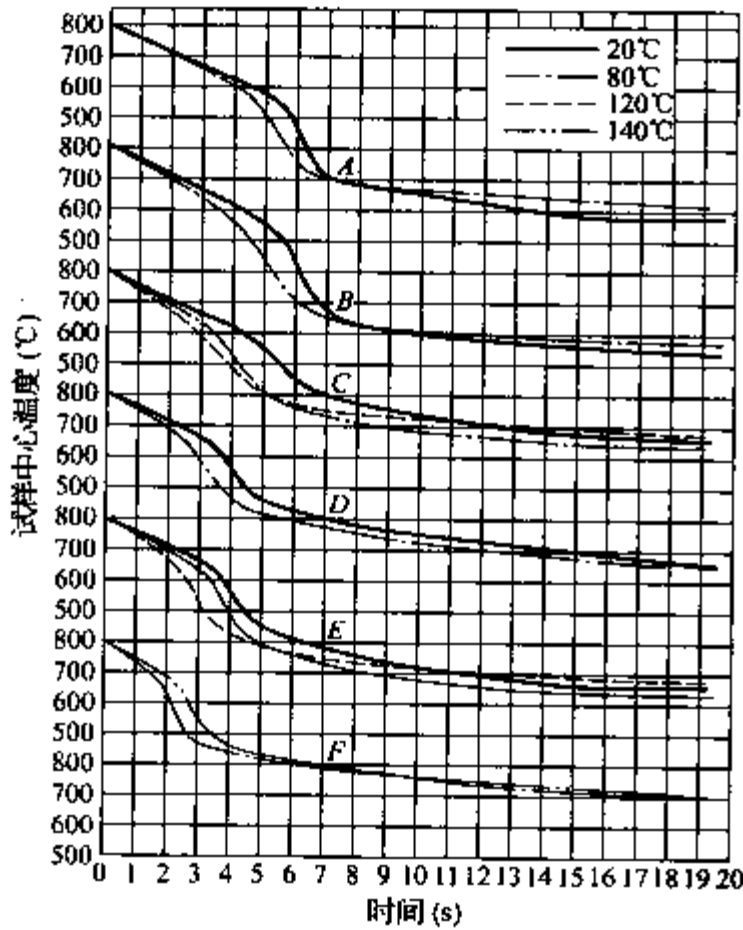


图 6-145 几种全系统损耗用油的冷却曲线

A—L-AN7; B—L-AN15; C—L-AN32;  
D—L-AN68; E—L-AN46; F—L-AN22

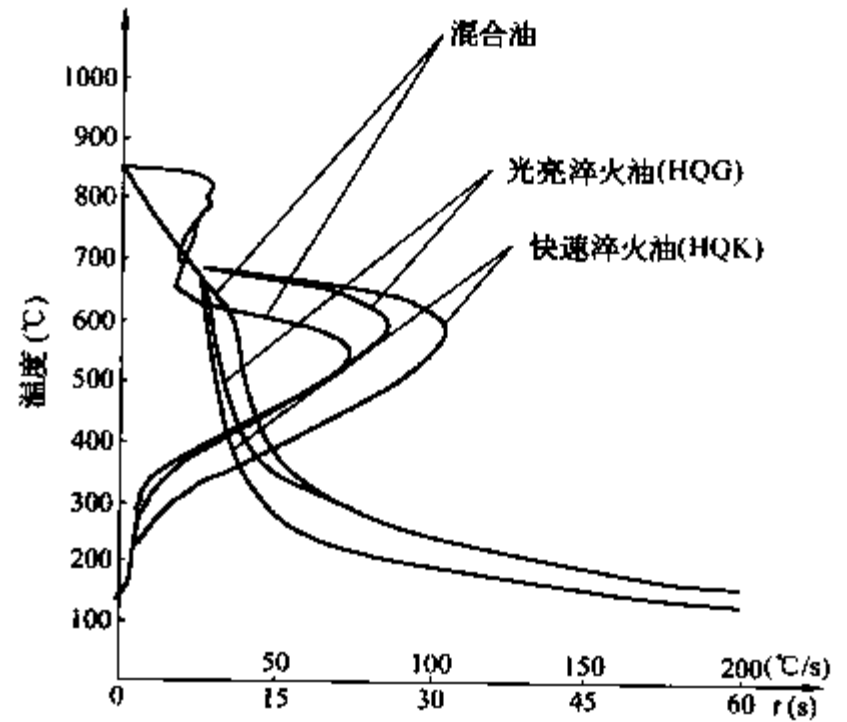


图 6-146 L-AN10+L-AN20(各 50%质量  
分数)的冷却曲线(50℃,未搅拌)

表 6-19 50%L-AN15+50%L-AN32(质量分数)混合后油的技术性能指标

项 目		指 标	试 验 方 法
运动黏度(40℃)(mm <sup>2</sup> /s)		19.8~24.2	GB/T265—1988
闪点(开口)(℃)		170	GB/T267—1988
水分(质量分数,%)		无	GB/T260—1977
倾点(℃) ≤		-10	GB/T510—1983
残碳(质量分数,%) ≤		0.15	GB/T268—1987
酸值(mgKOH/g)		0.14	GB/T264—1985
热氧化 安定性	黏度比 ≤	1.5	ZBE45001
	残碳增加值 ≤	1.5	
冷却 性能	特性温度 <sup>①</sup> (℃) ≥	500	ZBE45003
	特性时间 <sup>②</sup> (s) ≤	6.0	
	800℃→400℃冷却时间(s)	7.0	

注：① 试样冷却过程中由沸腾转入泡沸时的温度。

② 试样由淬火温度到达特性温度所用的时间。

全系统损耗用油使用时往往需要搅拌以增加冷却能力,但这会增加工件的畸变程度,使用温度一般不宜大于 50℃,使用中严禁带入水分。一般适用于中碳合金钢、渗碳钢、弹簧钢和部分碳素工具钢的淬火冷却。

## 二、专用淬火油

专用淬火油是由石蜡基的、环烷系的和芳香系的经精炼处理的基础油,添加特殊添加剂所组成,包括普通淬火油、快速(或快速光洁)淬火油、等温分级淬火油、回火油和真空淬火油。

淬火油的性能取决于基础油,对基础油的要求以及添加剂的选择反映在淬火油的冷却速度和稳定性上有很大的差别。一般专用淬火油要求具备以下三个方面的性能:① 冷却能力强,高温冷速尽可能快,低温冷速尽可能慢;② 使用中的性能稳定,抗氧化能力强;③ 使用中不需要进行添加剂调整。

### 1. 普通淬火油

普通淬火油要求具有高闪点和低黏度。黏度增加则意味着汽化困难,蒸汽膜长。黏度越大、闪点越高,特性温度和对流阶段的开始温度也越高。低黏度的油冷却能力强,油损耗也越少。

普通淬火油是由石蜡基润滑油加入制冷剂、抗氧化剂、表面活性剂调配而成,其技术性能指标见表 6-20,其中最常用的 2 号普通淬火油的冷却曲线见图 6-147。

表 6-20 普通淬火油技术性能指标

项 目	指 标				试 验 方 法
	1 号	2 号	WPZ-1	WPZ-2	
运动黏度(mm <sup>2</sup> /s) (40℃)	30	26	<18	<30	GB/T265—1988
闪点(开口)(℃) ≥	170	170	170	180	GB/T267—1988
水分(质量分数,%)	无	无	无	无	GB/T260—1977
倾点(℃) ≤	—	-10	—	—	GB/T510—1987
残碳(质量分数,%) ≤	0.2	0.4	0.2	0.2	GB/T268—1987

(续表)

项 目		指 标				试 验 方 法
		1 号	2 号	WPZ-1	WPZ-2	
酸值(mgKOH/g) $\leq$		0.1	0.1	—	—	GB/T264—1983
热氧化 安定性	黏度比 $\leq$	1.5	1.5	1.5	1.5	ZBE45001
	残碳增加值(质量分数,%)					
冷却 性能	特性温度( $^{\circ}\text{C}$ ) $\geq$	480	580	480	500	ZBE45003
	特性时间(s) $\leq$	4.7	3.8	—	—	
	800 $^{\circ}\text{C}$ →400 $^{\circ}\text{C}$ 冷却时间(s) $\leq$	5.0	4.5	5.0	5.0	

因闪点较低,普通淬火油的使用温度一般在 20~80 $^{\circ}\text{C}$ 。油温提高,温差缩小,黏度降低,流动性得到改善,使冷却均匀性增加,有利于降低工件的热应力。但油温每升高 10 $^{\circ}\text{C}$ ,氧化将增加 1.5~4 倍,而氧化对淬火油的冷却性能将产生很大的影响。

水分对普通淬火油的冷却性能有很大的影响(图 6-148),一般来讲,油中的水含量达到  $3 \times 10^{-2}\%$  以上时,淬火时就可能产生大量的泡沫,造成工件变形和开裂倾向增大,严重时更有可能造成火灾的危险。

普通淬火油的冷却速度相对较低,适用于具有一定淬透性的中高碳钢、合金结构钢、合金渗碳钢、轴承钢等结构件、工模具、仪表零件等的淬火冷却。

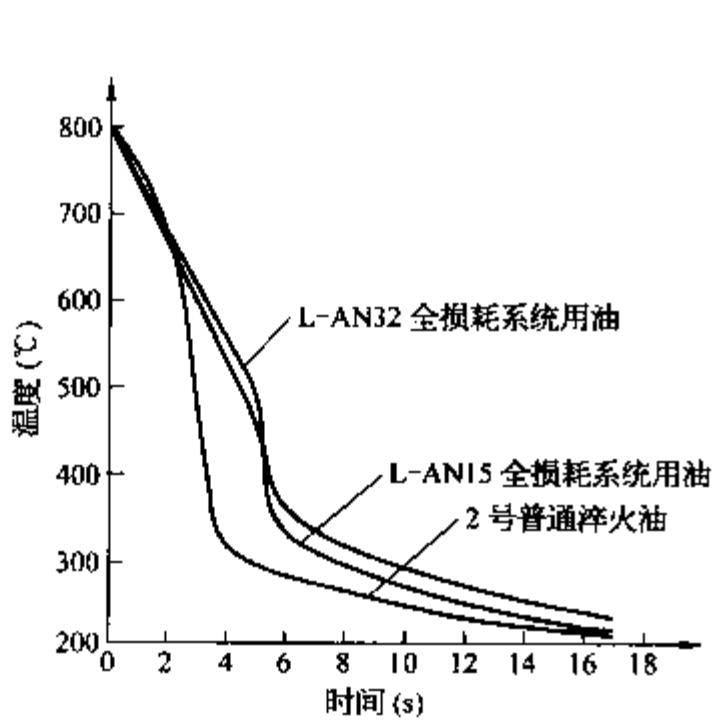


图 6-147 2号普通淬火油的冷却曲线与 L-AN15、L-AN32 的比较

(探头:  $\phi 10 \times 30$  mm, 银棒)

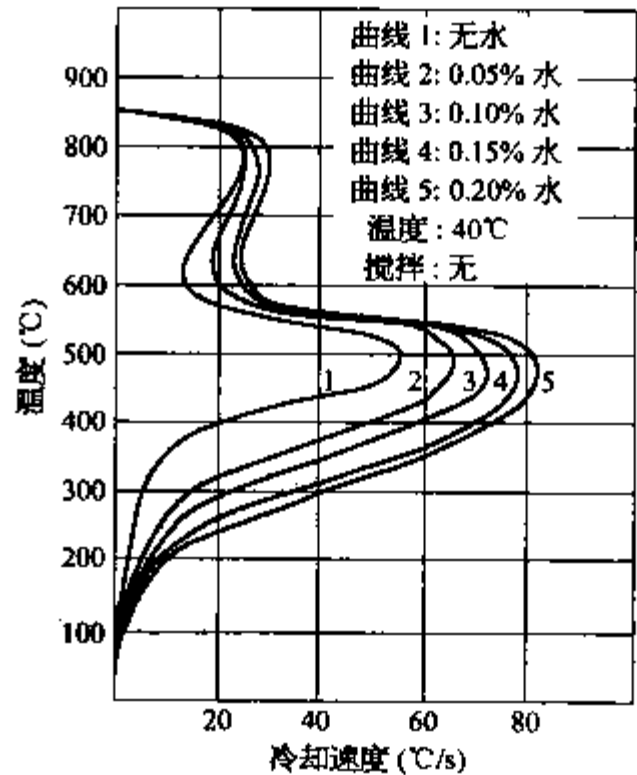


图 6-148 水分对普通淬火油冷却性能的影响

## 2. 快速淬火油(冷油)

理论上提高淬火油的冷却速度一般可采用以下三种途径: ① 降低黏度,降低界面张力;② 抑制气化,使蒸汽压降低,增大气化潜热;③ 降低界面张力的同时抑制气化。

实际上采用的方法是: ① 精炼基础油,使高温稳定性更好、分馏点温度更高;② 优化配方及原料,使特性温度更高、范围更宽;③ 提高黏温指数,降低油的黏度;④ 添加复合抗氧化剂,达到更长的连续使用

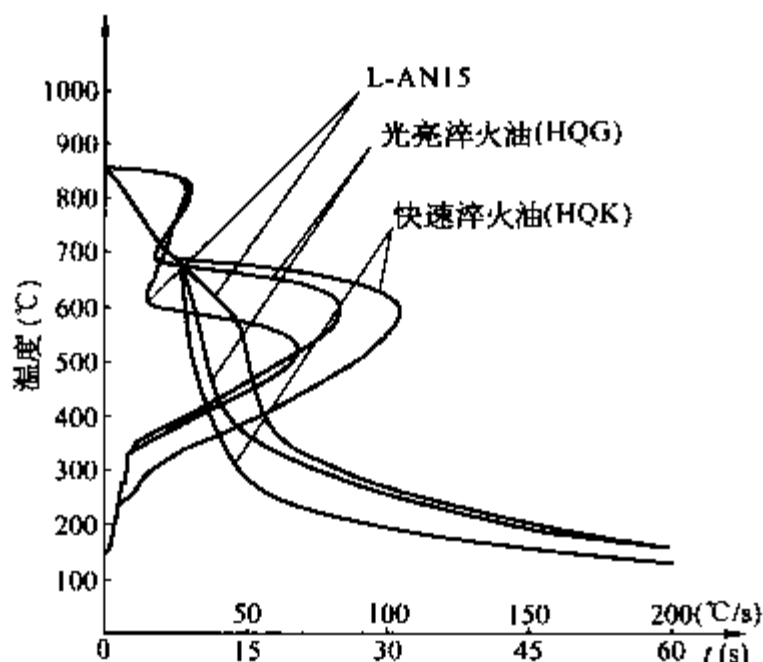


图 6-149 L-AN15 机械油与光亮及快速淬火油冷却性能比较

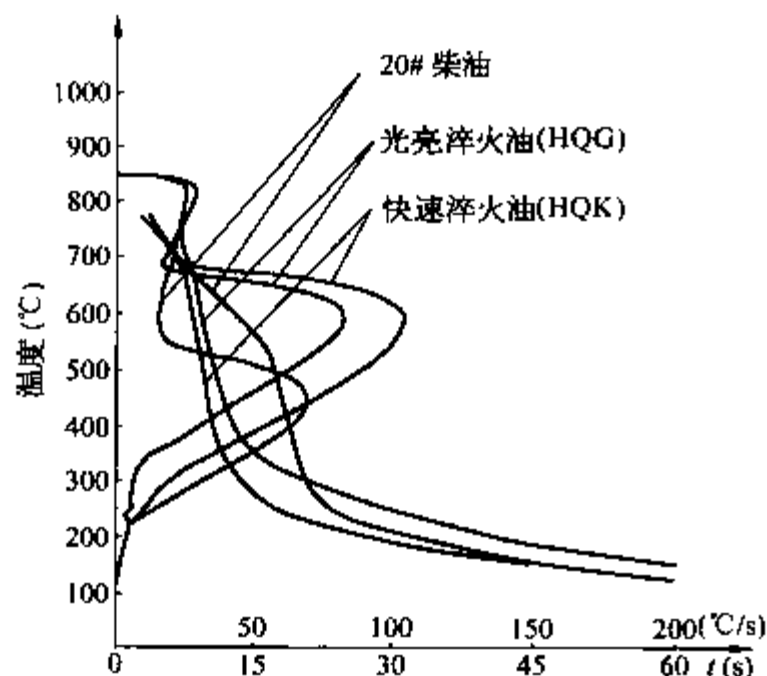


图 6-150 柴油与光亮及快速淬火油冷却性能比较

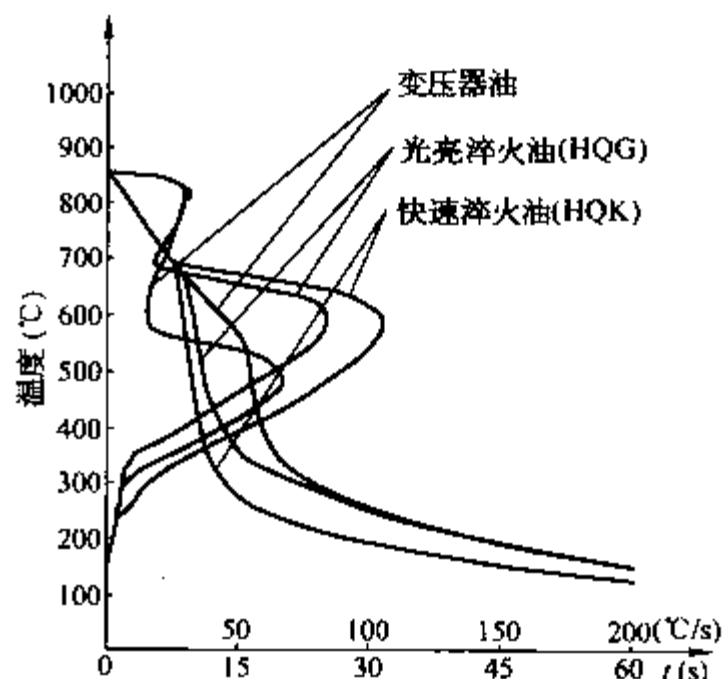


图 6-151 变压器油与光亮及快速淬火油冷却性能比较

时间。

与普通淬火油相比,快速淬火油的蒸汽膜阶段显著缩短,特性温度更高,无论是最大冷速还是最大冷速所对应的温度都明显改善。表 6-21 是常规淬火油与进口快速淬火油冷却性能比较,相应的冷却曲线见图 6-149、图 6-150 和图 6-151。

从表 6-21 可以看出,常规淬火油的最大冷却速度一般都在  $60\sim 70^{\circ}\text{C}/\text{s}$  之间,而且最大冷速所对应的温度都较低,有的甚至低于  $450^{\circ}\text{C}$ 。而 HQG 和 HQK 油无论是最大冷速还是所对应的温度都比常规油明显要高,最大冷速一般都出现在  $550^{\circ}\text{C}$  以上,这种特性对淬硬、淬透是非常有利的。从冷速曲线上也可以看出,常规淬火油的蒸汽膜比 HQG 和 HQK 淬火油几乎要长一倍,而且上特性温度也低。

表 6-21 常规淬火油与进口淬火油冷却性能的比较

油 品	最大冷却速度( $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ )	最大冷速对应温度( $^{\circ}\text{C}$ )	
常规 淬火油	L-AN15	67	518
	L-AN46	58	547
	柴 油	68	447
	变压器油	66	489
进口 淬火油	光亮淬火油(HQG)	82	587
	快速淬火油(HQK)	103	578

### 3. 等温分级淬火油(热油)

马氏体等温分级淬火实际上是将工件淬入一种温度接近于 Ms 点具有较高温度的油(俗称热油)中并保持一定的时间,然后在空气中冷却的一种工艺,这种工艺能有效地减少畸变,如图 6-152 所示。马氏体等温分级淬火油的选择依据最主要的是淬火速度、闪点和黏度。闪点决定了油可使用的温度范围,而黏度对带出量和残油的清理(或清洗)有很大影响。表 6-22 为进口和国产的几种马氏体等温分级淬火油的型号及性能指标。

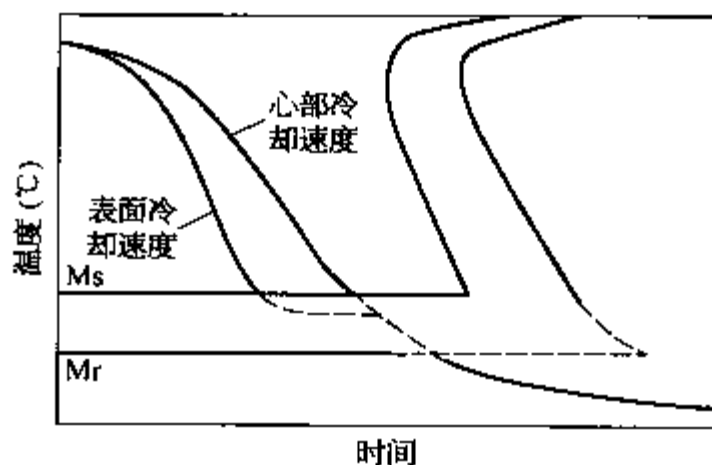


图 6-152 使用马氏体等温分级淬火技术减少畸变

表 6-22 几种不同的马氏体等温分级淬火油的性能指标

项 目		指 标					试验方法
		MT355	MT705	MT2565	Y35-I	Y35-II	
黏度 (mm <sup>2</sup> /s)	(40℃)	105	140	—	—	—	GB/T265
	(100℃)	—	—	33	15	20	
密度(g/cm <sup>3</sup> )	(20℃)	0.88	0.88	0.90	—	—	—
闪点(开口)(℃) ≥		230	230	270	220	240	GB/T3536
燃点(开口)(℃) ≥		260	260	300	240	260	
倾点(℃) ≤		-9	-7	—	—	—	—
康氏残碳值(%) ≤		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	—
上特性温度(℃) ≥		670	670	670	670	670	ISO9950
最大冷速典型值(℃/s)		75	75	75	85	85	

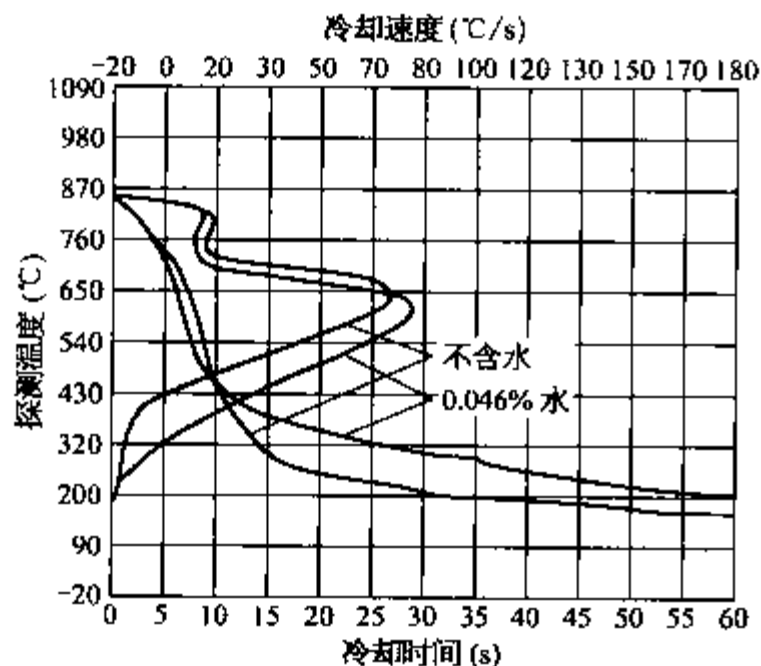


图 6-153 水分对马氏体等温分级淬火油(MT355)冷却性能的影响(油温: 120℃)

马氏体等温分级淬火油一般都在 100℃ 以上使用。与普通淬火油不同的是,它由精选的具有很高的抗高温氧化和热稳定性的基础油配制而成,具有较高的闪点和黏度,并含有一组或多组复合抗氧化剂,使用寿命较长。

马氏体等温分级淬火油的使用温度对冷速影响不大,但却可以非常有效地改善工件畸变。水对马氏体等温分级淬火油的影响见图 6-153。

### 三、真空淬火油

真空淬火油实际上属于快速淬火油中的一种。真空淬火油应具备以下几个性能: ① 低的饱和蒸汽压; ② 在较宽的压力范围内具有高的冷却能力; ③ 光亮性和热氧化安定性好。

压力对真空淬火油的冷却速度有很大的影响。随真空度的提高,蒸汽膜阶段延长,特性温度和冷却速度降低(图 6-154 和图 6-155),沸腾阶段向低温端移动。

由于在真空状态下,淬火油呈现沸腾状态,使淬火冷却烈度下降,淬火硬度和淬透层深度降低,因此为了得到高的硬度,要求加热结束后尽快使油面增压,故一般可通入大流量的高纯氮气或惰性气体(图 6-156)。真空淬火油与普通淬火油的压力对淬火硬度的影响见图 6-157。

由于真空状态下淬火油极易挥发,因此真空油的使用温度一般都在常温下使用。

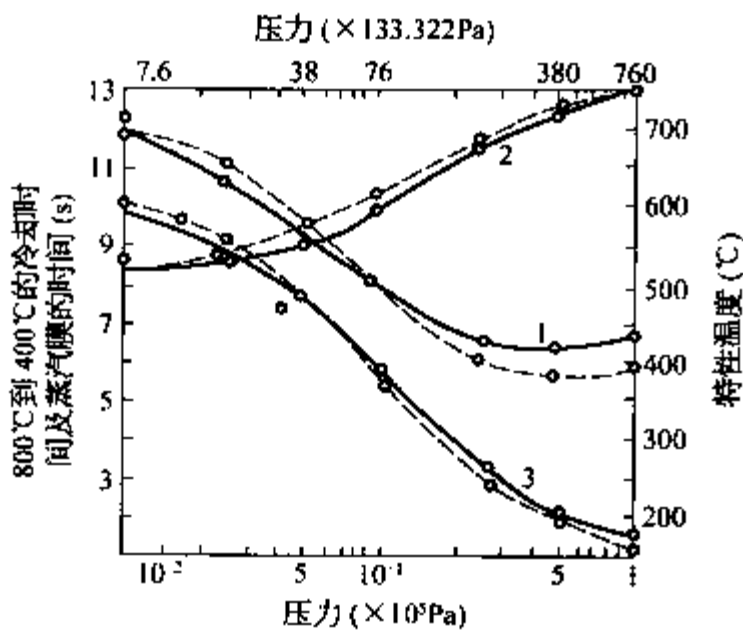


图 6-154 压力与蒸汽膜时间和特性温度的变化关系  
——常温；--- 60 $^{\circ}\text{C}$   
1—800 $^{\circ}\text{C}$ →400 $^{\circ}\text{C}$ 的时间；2—特性温度；3—蒸汽膜时间

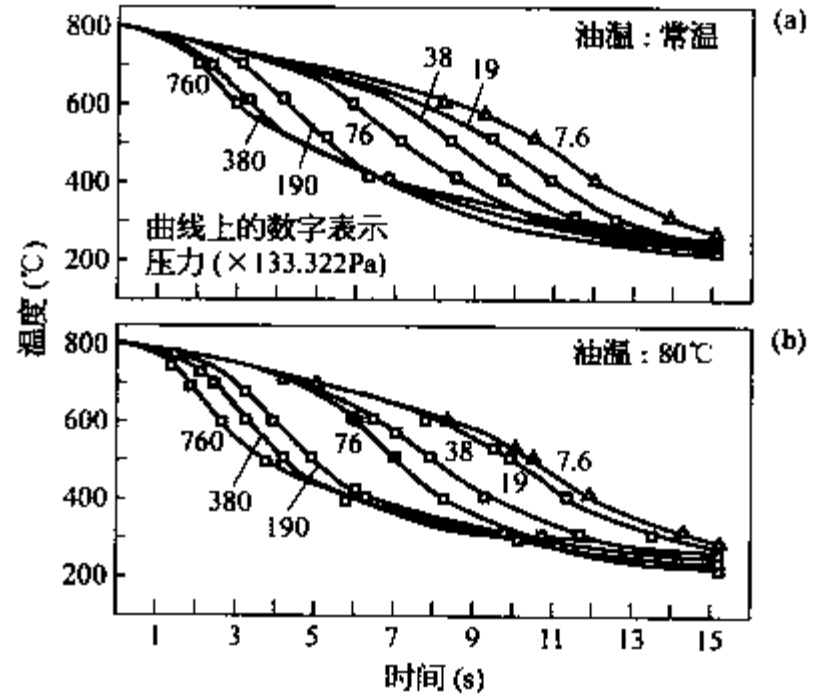


图 6-155 压力对冷却曲线的影响

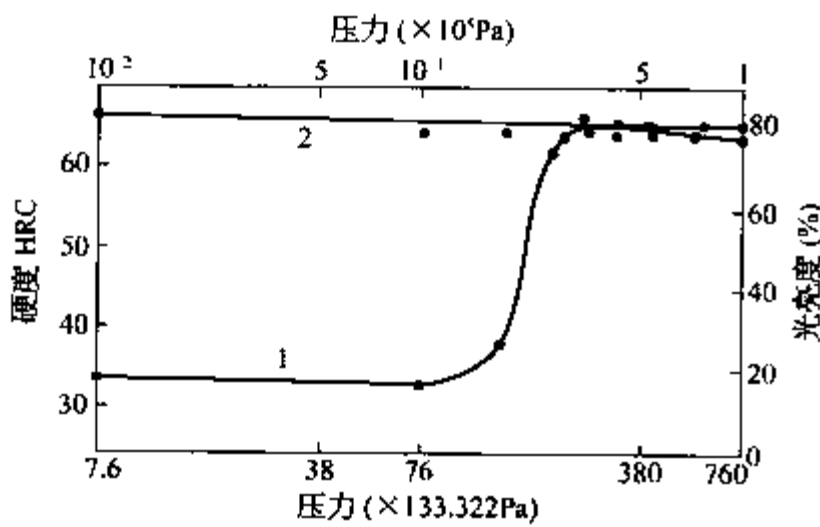


图 6-156 临淬火前的压力对淬火硬度及光亮性的影响  
1—淬火硬度；2—光亮性

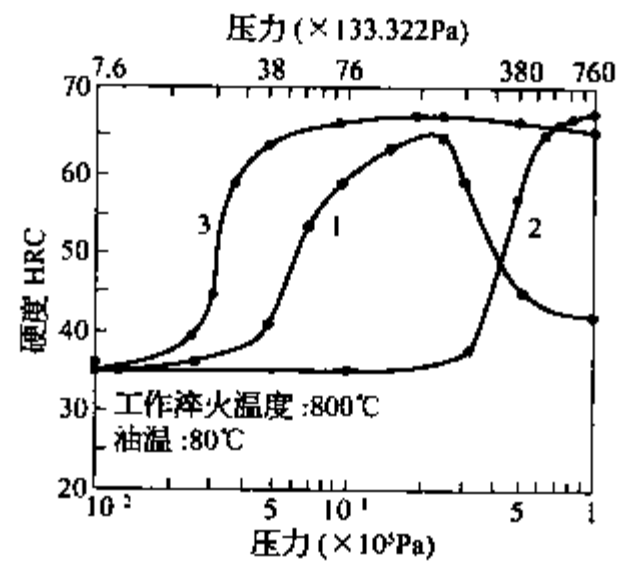


图 6-157 真空淬火油与普通淬火油和矿物油的压力对淬火硬度的影响  
1—矿物油；2—普通淬火油；3—真空淬火油

#### 四、淬火油的氧化/老化

随着使用时间的延长或使用温度的提高,淬火油会出现氧化或老化现象。基础油的质量直接影响到油的老化,使用温度每升高 10 $^{\circ}\text{C}$ ,淬火油老化就将提高 1.5~4 倍。

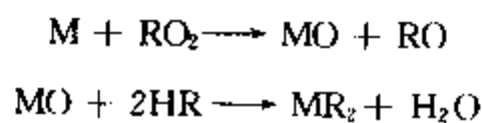
##### 1. 淬火油老化机理

淬火油与炽热的金属接触后,会发生热分解、氧化和聚合,这个过程可分成四个阶段:

第一阶段: 不饱和烃、不稳定的石蜡及链长较短的环烷族烃的强烈热分解。

第二阶段: 烃的继续热分解。不稳定的自由基与氧反应,生成二氧化碳和水,或者生成过氧化物  $\text{RO}_2$ 。

第三阶段: 过氧化物按如下反应方程式进行分解和聚合:



式中 M——金属;

$\text{RO}_2$ ——过氧化物;

HR——有机酸；

RO——酮。

温度越高,这个阶段就进行得越激烈。金属杂质的存在将促进淬火油的氧化和聚合。

第四阶段:烃的聚合。

淬火油老化反应,贯穿着热分解和氧化两个过程(图6-158)。实际使用中,依使用条件的不同而不同,初期或油的使用温度较高时,一般以氧化为主;而在有保护气氛保护下,则以热分解为主。总之,这两个过程一般是同时进行的。

## 2. 淬火油老化后的性能

淬火油老化后,通常情况下使黏度增加、闪点升高,产生大量的油泥并粘附在工件上,使油的冷却能力恶化,造成工件的淬火硬度下降,甚至出现软点、畸变增加或开裂,同时影响工件的色泽。

氧化和热分解,各以不同的方式影响油的性能。氧化可使闪点提高,而分解却使闪点降低。长期使用的淬火油,随时间增加会形成酸性或中性的反应物,其中一部分溶解于淬火油中,而无法溶解的则形成沉淀即所谓的油泥。油泥的形成使淬火油逐渐失去透明度并变得黏稠,且容易起泡沫。

氧化因生成可溶性的酸或脂,有助于提高油的润湿性,降低蒸汽膜的稳定性,通常能加快油的冷却速度。由于这种氧化和裂解生成的碳氢化合物极不稳定,极易聚合并形成油泥。

随老化的进行,特性温度升高,特温秒缩短。但再进一步老化时,特性温度下降,蒸汽膜时间延长,特温秒增加。酸值、黏度、油泥量等随老化时间的增加而上升,但酸值在热分解完成后就基本不再增加了,而黏度和油泥却以指数关系上升。实际上,黏度增加得越快,油泥量反而比较少;而油泥多的,黏度上升反而少。

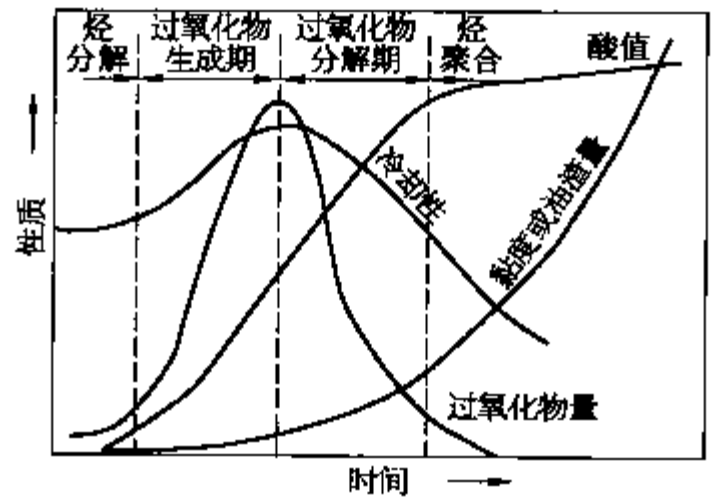


图 6-158 油的老化过程示意图

## 第六节 水及水溶性淬火介质

淬火冷却介质除常用的水、无机物水溶液及植物油或动物油外,还有多种商品型号的聚合物水溶性淬火液。

### 一、水及无机物水溶性淬火介质

由无机盐、碱组成的水溶液称为无机物水溶性介质。常用的有氯化钠、氯化钙、碳酸钠、氢氧化钠、硝酸盐及水玻璃等水溶性淬火介质。

#### 1. 水

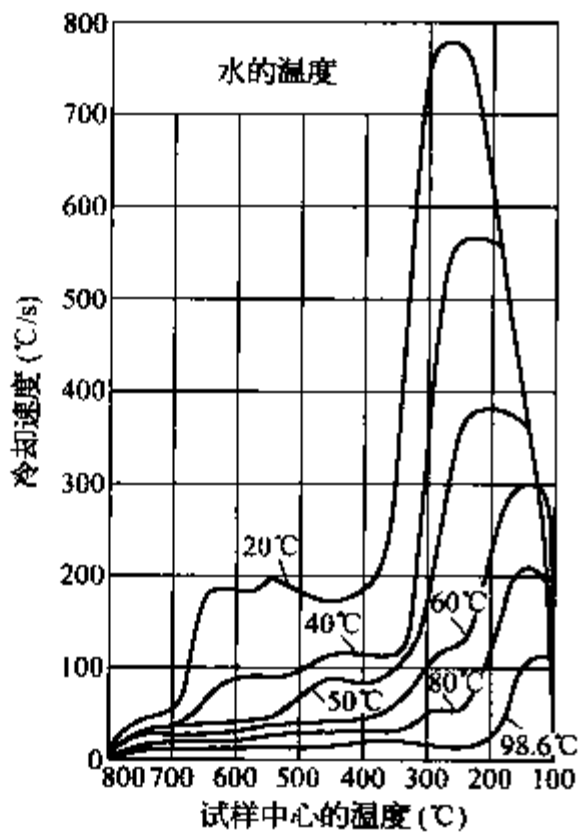
水是最简单的淬火液,水的冷却速度大,具有强的冷却能力,其冷却曲线如图6-159。水的蒸汽膜阶段长易产生气泡,淬火工件易出现软点。最大冷速一般出现在低温段,因此水淬容易出现开裂倾向。

#### 2. 氯化钠水溶液

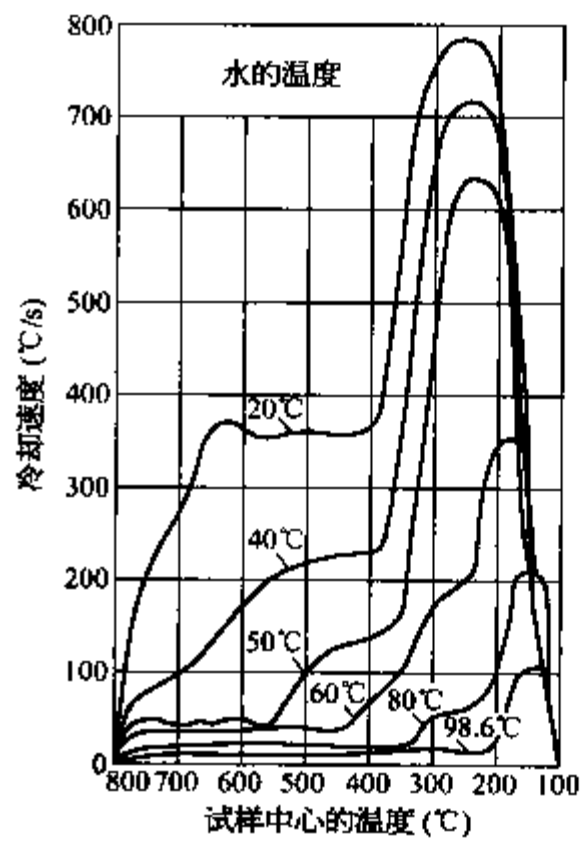
氯化钠应符合热处理用盐 ZBJ36007 标准,冷却曲线见图6-160。氯化钠水溶液的使用浓度一般在5%~20%,随着氯化钠在水中溶解度的升高,冷却速度增加,但达到20%的饱和溶解度时,冷速并不高。氯化钠水溶液的使用温度一般在20~40℃,可在静止、搅拌、循环状态下使用,常用于碳素结构钢、碳素工具钢以及低合金低淬透性钢的淬火。

水中溶入氯化钠后,使汽化热、热容量、导热性、密度、黏度、沸点等都发生了变化。氯化钠使冷却能力提高是由于盐的爆炸作用而使蒸汽膜迅速破裂,缩短蒸汽膜时间,提高特性温度的结果。与水相比,氯化钠水溶液具有更高的冷却能力。





(a)



(b)

图 6-159 不同温度下水的冷却速度(φ20 mm, 银探头)

(a) 静止; (b) 循环

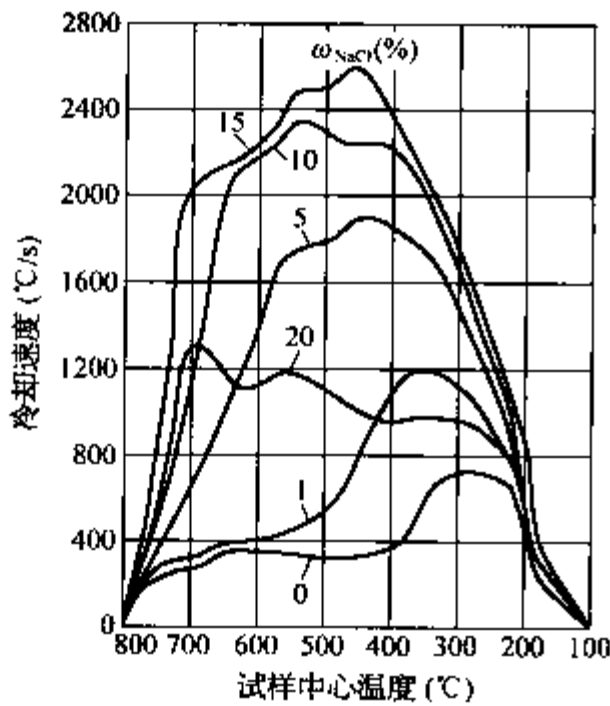


图 6-160 氯化钠水溶液的冷却能力

(φ20 mm 银球, 液温 20°C, 试样移动速度 0.25 m/s)

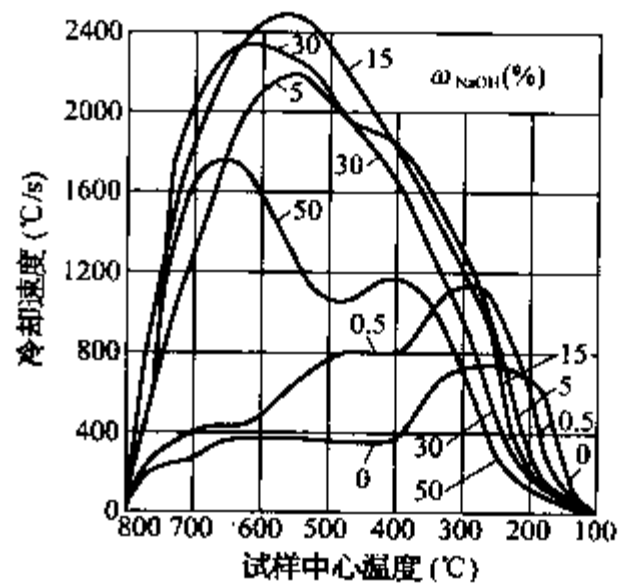


图 6-161 氢氧化钠水溶液浓度与冷速的关系

(φ20 mm 银球, 20°C, 试样移动速度 0.25 m/s)

提高液温, 对盐在水中的饱和溶解度影响很小, 但却使溶液的汽化热降低, 从而使冷却能力下降。

### 3. 氢氧化钠水溶液

碱与盐一样影响蒸汽膜的稳定性和改变水的沸点。在相同浓度下, 氢氧化钠水溶液的冷却能力比盐水溶液大, 淬透层也更深(图 6-161)。

氢氧化钠水溶液的使用温度一般在 20~60°C。浓度在 5%~15% 时, 随浓度提高, 冷速增加, 到 15% 时达到最大; 常用于淬透性较低的碳素结构钢、碳素工具钢的淬火; 浓度在 30%~50% 时, 用于易畸变、开裂或形状复杂的工件及工模具钢的淬火。温度对 50% 浓度氢氧化钠水溶液冷却速度的影响见图 6-162。高浓度时一般应在冷态下使用。

## 二、有机聚合物水溶液淬火介质

可用作淬火介质的聚合物有多种,目前使用较为成功并商品化了的聚合物主要有:聚乙烯醇(PVA)、聚醚、聚烷撑乙二醇(PAG),此外还有聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚丙烯酸钠(ACR)、聚酰胺(PAM)和聚乙基噁唑啉(PEO)等。

以聚烷撑乙二醇(PAG)为代表的聚合物水溶性淬火介质具有三个方面的优点:①消除火灾危险;使工作环境更清洁、安全,淬火过程中无油烟。②通过浓度、液温和搅拌的调整,技术上可得到一个在较大范围内的冷却速度,使用范围更广泛。可有效避免水淬时容易产生的淬火软点;与水淬相比,有更小的畸变和开裂倾向。③稀释使用,带出量少,成本更低;可不清洗直接回火;具有比油几乎大两倍的比热容,因而介质温升更小。

### 1. 聚乙烯醇(PVA)

聚乙烯醇(PVA)淬火液的基本组成及技术指标见表6-23和表6-24。聚乙烯醇使用时的浓度较低,一般在0.1%~0.5%之间。聚乙烯醇淬火液的冷速随浓度、温度的变化极其敏感(图6-163、图6-164),低浓度(<0.01%)聚乙烯醇室温时的冷却性能与水的差别不大。聚乙烯醇使用时应适当搅拌,因其很容易老化,一般使用1~3个月就需要更换。

表 6-23 聚乙烯醇合成淬火液的基本组成(JB4393—1987)

名称	含量(质量分数,%)
聚乙烯醇	≥10
防锈剂	≥1
防腐剂	≥0.2
消泡剂	≥0.02
水	余量

表 6-24 聚乙烯醇合成淬火液技术指标(JB4393—1987)

名称	指标
外观	无色到浅黄色、均匀溶解的半透明液体
固体含量(质量分数,%)	10~12
条件黏度(以涂-1黏度计为标准)	20~50
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.015~1.035
pH	6~8
折光率	1.347 0~1.352 0
电导率(S/m)	0.2~0.3

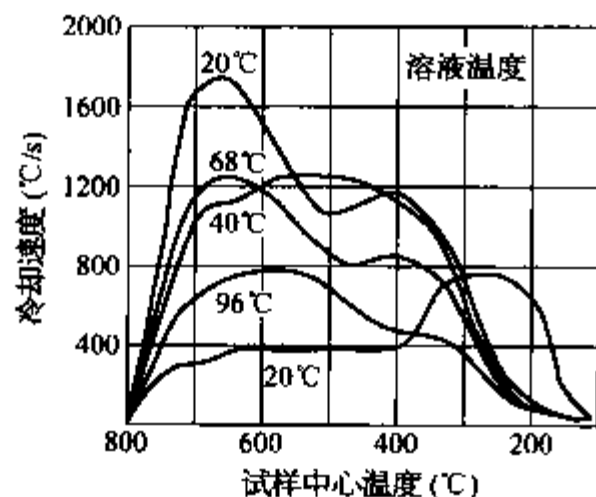


图 6-162 50% 氢氧化钠水溶液冷速与温度的关系  
( $\phi 20$  mm 银球, 试样移动速度 0.25 m/s)

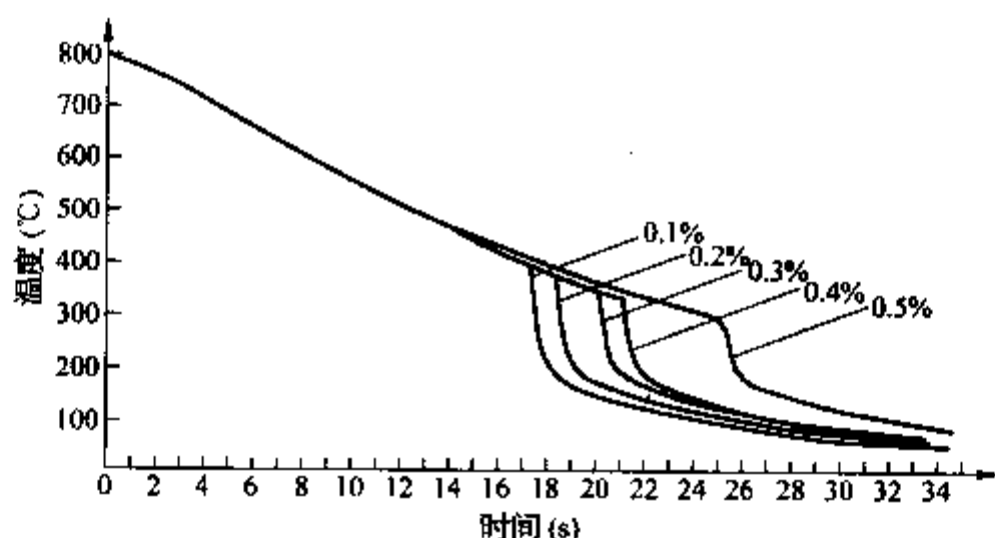


图 6-163 不同浓度(质量分数)聚乙烯醇淬火液 40°C 时的冷却曲线  
( $\phi 20$  mm, 银探头)

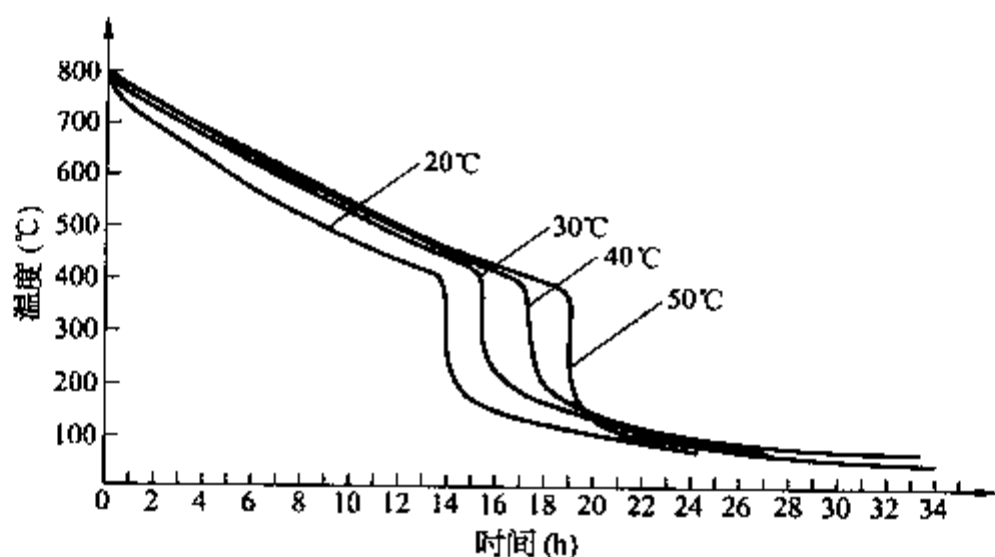


图 6-164 0.1%浓度(质量分数)的聚乙烯醇淬火液不同温度下的冷却曲线  
( $\phi 20$  mm, 银探头)

### 2. 聚醚

聚醚是环氧乙烷和环氧丙烷以不同配比聚合而成的共聚物,具有逆溶性。所谓逆溶性是指聚合物在常温下可完全溶解于水中,随温度的升高,当超过逆溶温度(一般在  $70\sim 75^{\circ}\text{C}$ )以后,溶解度下降而产生脱溶的现象。

聚醚淬火液的冷速随浓度的增加而降低。CL-1 聚醚的冷却曲线见图 6-165。

聚醚淬火液的使用浓度一般在  $5\%\sim 40\%$ ,液温一般控制在  $20\sim 45^{\circ}\text{C}$ 之间,冷速介于水和油之间;适用于整体淬火,也可用于喷射冷却,可用于合金结构钢、碳素工具钢及模具钢的淬火冷却。

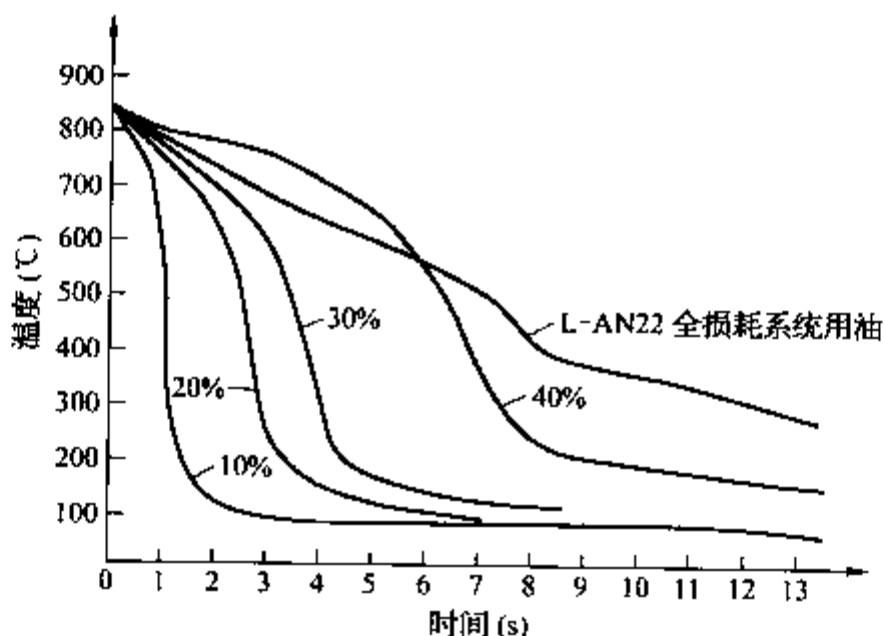


图 6-165 不同浓度(质量分数)的 CL-1 聚醚淬火液与油的冷却曲线  
( $\phi 20$  mm, 银探头)

有些聚醚容易断链、老化,有时将其与乙二醇按一定比例混合后溶于水,配成不同浓度的聚醚-乙二醇淬火液,同样的,浓度越高,冷速越低。与单一的聚醚淬火液相比,淬火后工件可获得较均匀的硬度,降低带出损耗。

聚醚-乙二醇淬火液的使用浓度一般控制在  $15\%\sim 20\%$ 之间,可用于合金结构钢、碳素工具钢的淬火冷却中。

### 3. 聚烷撑乙二醇

聚烷撑乙二醇(PAG),是一种目前使用广泛、性能稳定的聚合物水溶性淬火液,具有逆溶性。由于 PAG 可提供从油到盐水之间的任意冷速,理论上可替代油进行热处理淬火。一般可根据材料淬透性、性能要求,在综合考虑了设备、零件尺寸的情况下通过浓度、液温和搅拌的调节来灵活地得到所需的冷却性能。表 6-25 列出了聚烷撑乙二醇(PAG)与聚乙烯醇(PVA)、聚醚性能上的区别。

表 6-25 聚烷撑乙二醇(PAG)与聚乙烯醇(PVA)及聚醚的性能比较

介质	化学特性	物理特性	冷却特性	应用范围
聚烷撑乙二醇 (PAG)	非离子型; 遇无机盐不分解; 特殊要求的分子链长和分子量	比下述两者更大的剪切强度, 不易降解, 浓度易控制。具有逆溶性, 无气味, 不易老化发臭	冷却性能可靠, 易于控制和管理。淬后工件表面不易形成难清洗的残留, 可直接回火	碳钢、合金钢、渗碳钢等表面淬火、整体调质淬火。可替代油淬
聚乙烯醇 (PVA)	非离子型; 遇无机盐易分解; 分子链短, 易降解、老化	无逆溶性; 在机械作用下易断链; 浓度不易控制	浓度对冷速影响很大, 冷却性能不稳定, 淬后工件表面形成难以消除的油漆状黏性残留; 容易变质发臭	中碳钢及中碳低合金结构钢的感应淬火
聚 醚	—	有逆溶性, 有刺激性气味; 容易断链、降解	淬后工件表面形成难以消除的黏性残留; 带出量大; 容易变质发臭, 影响环境	中、低合金钢的代油淬火

以 AQ251 为例, 浓度、液温和搅拌对聚烷撑乙二醇 (PAG) 冷却能力的影响分别见图 6-166~图 6-168。一般而言, 随浓度升高, 最大冷速及 300℃ 的冷速降低。有时可利用下式大致确定 300℃ 的冷速:

$$a = 0.004V^2 - 0.8V + 42.5$$

式中  $a$ ——浓度;

$V$ ——300℃ 的冷速。

搅拌对 300℃ 冷速即马氏体相变区的冷速影响不大, 但对最大冷速却有明显的影响。随温度升高, 最大冷速和低温冷速均下降, 但对低温冷速的影响比对高温冷速的影响稍弱些。

PAG 淬火液已替代水或矿物油用于工件的整体调质处理、感应加热等淬火冷却中, 典型的应用场合包括: 齿轮淬火、曲轴、凸轮轴、驱动轴、轴承圈、管/棒材等的淬火。PAG 的最佳使用温度一般在 30~40℃。

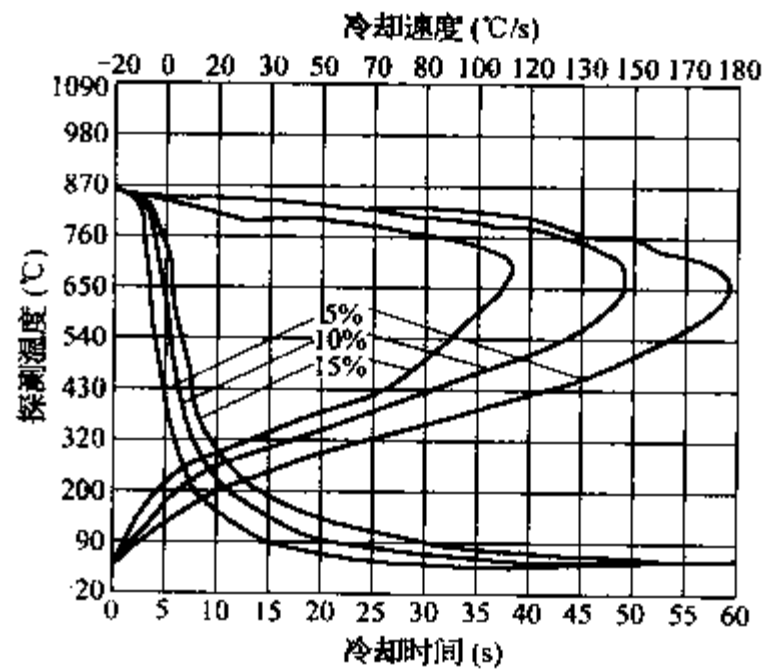


图 6-166 浓度对 AQ251(PAG)冷速的影响 (40℃, 有搅拌)

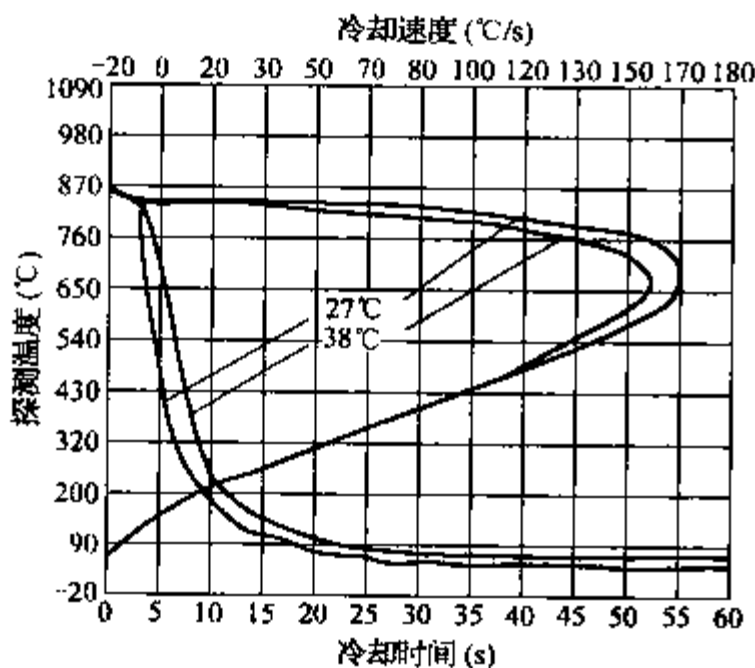


图 6-167 液温对 10%浓度的 AQ251(PAG)冷速的影响

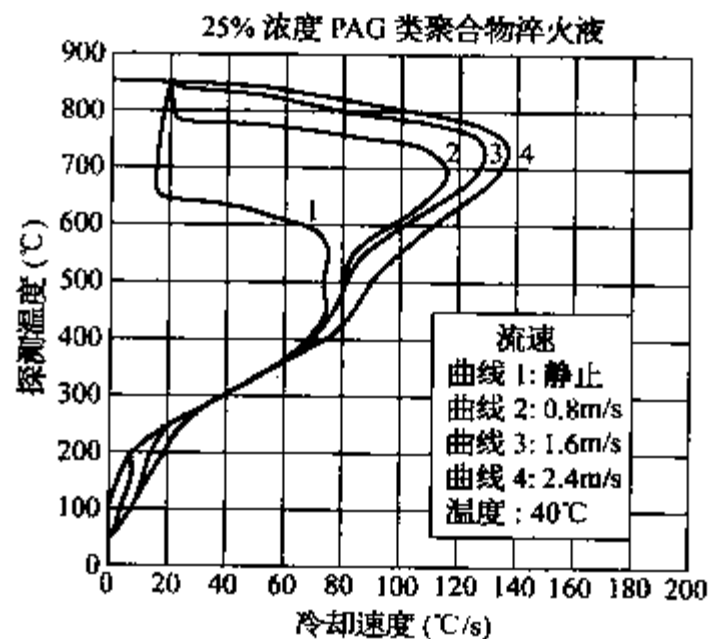


图 6-168 搅拌对 25%浓度 AQ251(PAG)冷速的影响



## 典型零件热处理

### 第一节 机床零件热处理

机床零件的热处理,对保证机床零件性能、制造精度及装配精度有重要影响。

#### 一、机床导轨热处理

##### 1. 机床导轨的基本性能要求

导轨是机床的基准件,要求持久地保持导轨的平直度与耐磨性能,确保机床的精度和使用寿命。导轨工作面的失效形式为磨损、拉伤、碰伤及疲劳损坏。

##### 2. 机床导轨的表面淬火

机床导轨的表面淬火主要适用于滑动导轨。

导轨材料: HT200、HT250、HT300、HT350。

材料的技术要求: 基体硬度 $\geq 187$  HB;显微组织: 珠光体及细小片状石墨,珠光体量 $\geq 90\%$ 。

1) 机床导轨接触电阻加热淬火 接触电阻加热淬火设备简单、操作容易,淬火后畸变小仅需油石打磨,不必磨削加工,在机床维修中应用较多。

淬火技术要求: 硬度 $\geq 550$  HV,花纹排列整齐、疏密均匀,不允许有烧伤现象;显微组织: 隐晶状(或细针状)马氏体加少量残留奥氏体。

常用工艺参数:

铜轮电极板厚——1 mm;

淬火电流密度——450~500 A/mm<sup>2</sup>;

电压——2~6 V;

滚子上加压力——40~60 N;

铜轮线速度——5~8 mm/s。

2) 机床导轨感应淬火 机床导轨感应淬火用感应器安装调试见图 7-1。依导轨截面形状不同,感应器有多种结构,如平面导轨(图 7-1a)、V形导轨(图 7-1b)、山形导轨(图 7-1c)、燕尾形导轨(图 7-1d)等。

感应器的有效线圈至少有两匝,第一匝作预热用,第二匝装导磁体作加热用。两匝相距 6~10 mm。感应器斜下方 45°处钻 $\phi 0.8\sim 1.5$  mm、间距 2~4 mm 的一排喷水孔。导轨表面与感应器最小间隙为 2~2.5 mm,棱角处为 5~7 mm。

不同的机床导轨淬硬层深度要求有别: 导轨平面,高频淬火, $\geq 0.8$  mm;超音频淬火, $\geq 1.5$  mm;中频淬火, $\geq 2.0$  mm;导轨峰顶, $\leq 4$  mm;导轨棱角, $\leq 6$  mm。显微组织为隐针状马氏体+石墨。不允许有粗大马氏体和大量残留奥氏体。

不同材料的淬火硬度要求: HT200、HT250,硬度 $\geq 65$  HS(49 HRC);HT300、HT350,硬度 $\geq 68$  HS(51 HRC)。淬硬区内不允许有软点、软带。畸变量 $\leq 0.15$  mm/m。外观检查不允许有烧伤、裂纹等缺陷。

灰铸铁导轨感应淬火常见缺陷及解决办法见表 7-1。

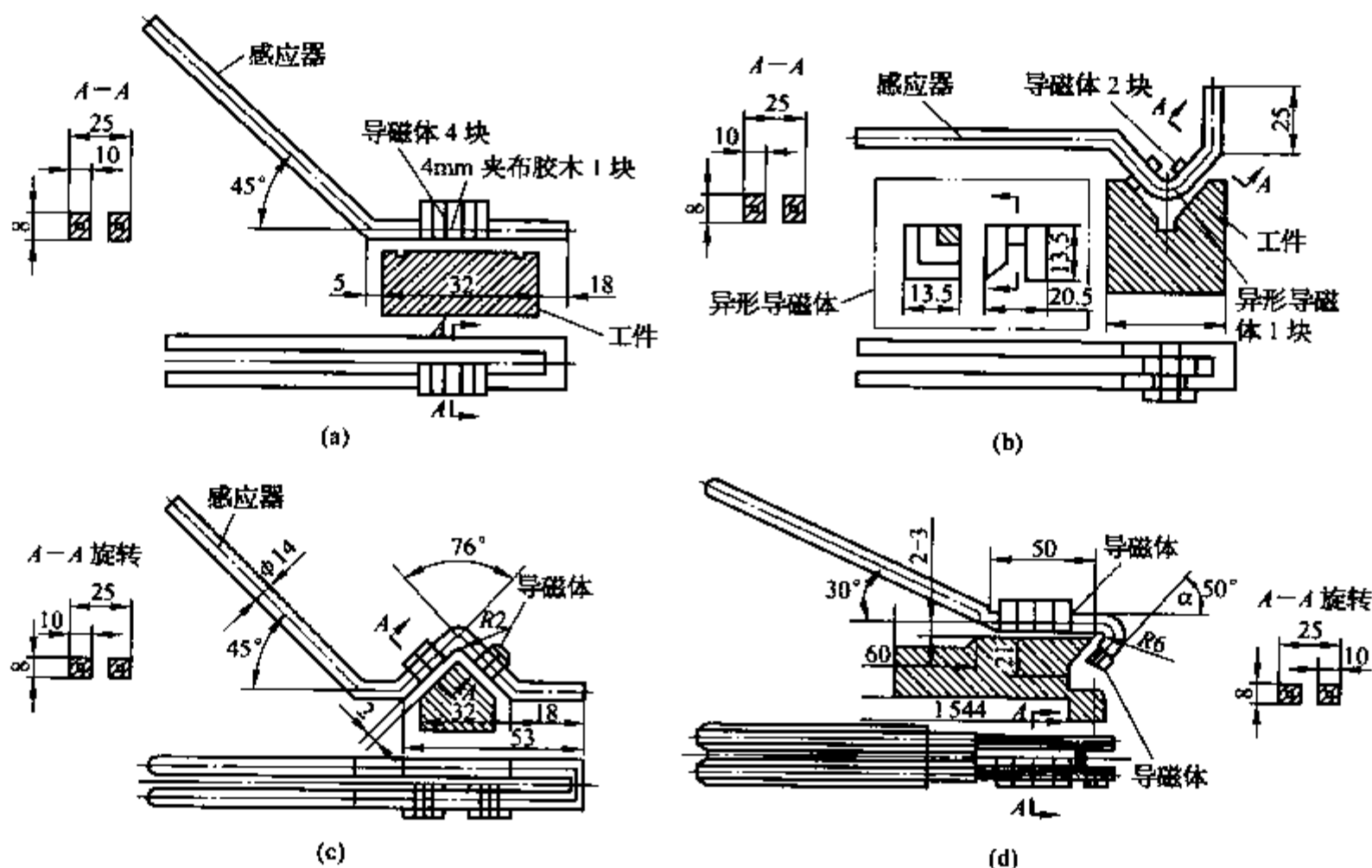


图 7-1 导轨感应淬火时感应器安装调试示意图

表 7-1 灰铸铁导轨感应淬火常见缺陷及解决办法

缺陷	产生原因	解决办法
硬度低	原始组织中 ferrite 含量较多, 化合碳低, 硬度低, 加热温度低, 冷却水不足或水压低	应严格按 JB/T3997 标准控制原材料, 正确选择并认真执行淬火工艺参数, 适当提高加热温度或水压
硬化层浅或厚度不均	感应器与导轨面间隙不均或不合理, 加热速度太快, 喷射冷却水压力低	正确设计感应圈及浮动装置, 合理布置导磁体, 调整好淬火机床, 适当提高冷却水压, 如可提高到 0.2~0.4 MPa
淬火裂纹	淬火温度过高, 冷却太剧烈, 原材料成分不符或组织不良, 淬火中途停顿随后从该处继续接淬, 重复淬火以及导轨两端不平整或有尖角	正确掌握工艺, 减缓冷却速度, 原始组织中不应有激冷组织, 化学成分合格, 淬火中途停顿后须退回起始端, 重复淬火应先行高温回火或退火, 导轨两端加工平整、倒角
硬度不均和软带	淬火介质温度过高, 水压不足, 淬火硬度不均。在淬火导轨的起止端、淬火中断、继续淬火的交界处常出现软带	正确执行工艺, 感应器在起淬端外 5 mm 处预热, 使端部温度达 750℃ 左右再开始淬火运动, 尾端可用加长导轨或调高阳极电流保证该处加热足够, 中断淬火应退回起端重淬
淬火畸变	导轨感应淬火后, 均导致表面下凹, 导轨长度方向中部表面下凹值最大, 下凹值与床身的刚性、长度、淬火、硬度、组织、深度、操作以及感应器设计等有关	导轨切削时加预应力, 使之刨后向上凸 0.1~0.2 mm 或感应加热淬火时, 加向上凸预应力, 抵消淬火后的下凹现象。不需淬火的导轨底面机加工在淬火后进行

以机床导轨高频感应淬火为例, 导轨淬火前应预变形, 向上凸 0.1~0.2 mm/m, 抵消淬火后的导轨下凹畸变。淬火时感应器不动, 导轨在淬火机床上移动, 移动速度为 2~4 mm/s; 淬火温度一般为 900~950℃; 用 0.1~0.15 MPa 压力的自来水喷水冷却; 必须准确掌握冷却时间, 以控制余温, 达到自行回火的目的。

### 3. 机床导轨的整体热处理

整体热处理适用于镶钢导轨及精密机床的滚动导轨, 导轨硬度一般要求  $\geq 60$  HRC, 有足够的淬硬层深度

及高的精度稳定性,满足滚动负荷状态下的高接触疲劳性能要求。

这类导轨常用材料:9Mn2V、CrWMn、GCr15、GCr15SiMn等。

某精密机床的滚动导轨(图7-2),材料为GCr15SiMn,淬火硬度 $\geq 60$  HRC。滚动导轨制造工艺流程为:锻造—正火—退火—刨、钻—去应力退火—精刨—淬火、冷处理、回火—半精磨—时效—精磨。热处理工艺曲线见图7-3。

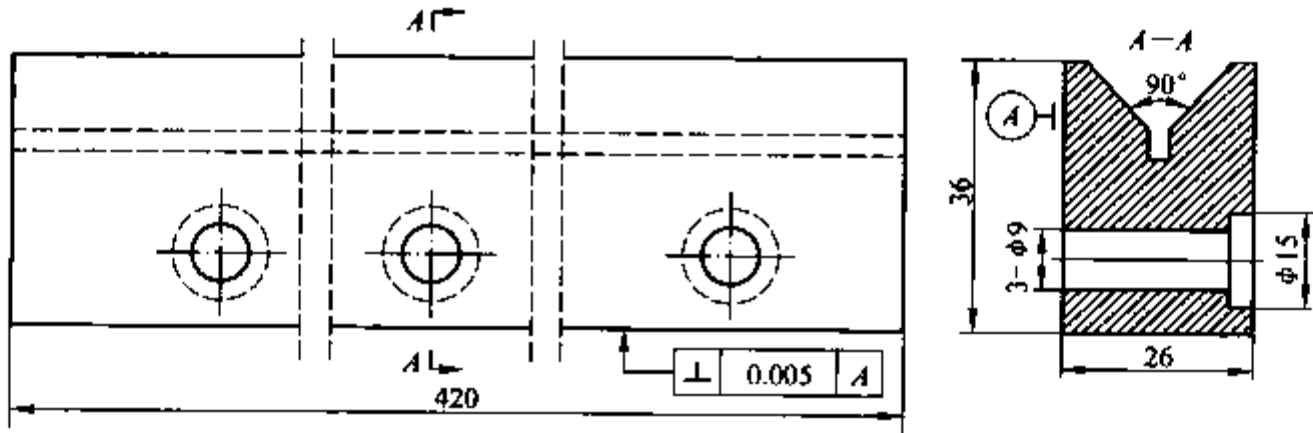


图7-2 机床滚动导轨零件图

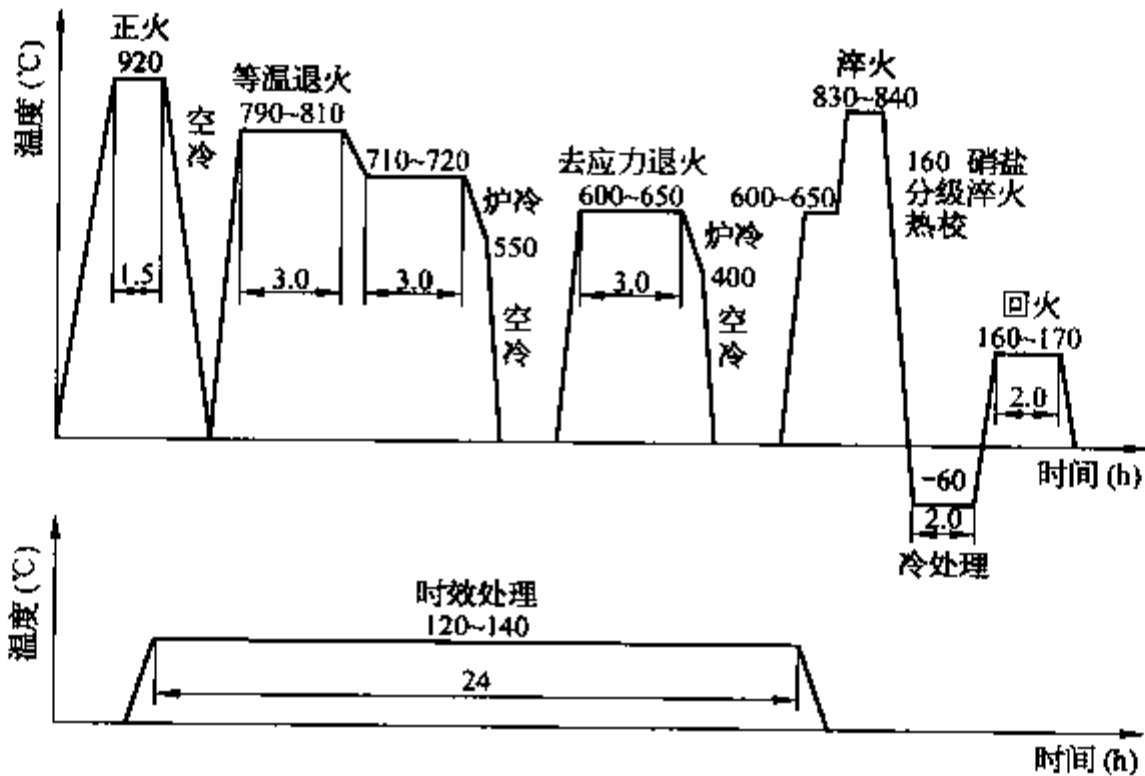


图7-3 滚动导轨热处理工艺

## 二、机床主轴热处理

### 1. 机床镗杆的热处理

机床镗杆在工作下承受弯曲、扭转、冲击负荷,其滑动及转动部位受摩擦作用;要求镗杆具有足够强度、刚度、耐疲劳、耐磨损及持久稳定的高精度。

专用数控镗床镗杆见图7-4。其材料为38CrMoAlA,热处理技术要求:基体硬度254~283 HB,渗氮层深度0.4~0.6 mm,渗氮层表面硬度 $\geq 900$  HV,渗氮层脆性 $\leq 1$ 级,不直度 $\leq 0.05$  mm。

机床镗杆的制造工艺流程:下料—正火—粗车—调质—半精车、铣槽—高温去应力—精车、钻孔—高温去应力—磨削—低温去应力(时效)—渗氮—精磨。热处理工艺曲线见图7-5,所有的热处理工序,均垂直吊挂于不同的井式炉中完成。

调质获得的显微组织为均匀回火索氏体,表层4 mm内不允许有游离块状、针状铁素体,镗杆心部游离铁素体少于5%;不直度 $\leq 0.5$  mm;调质后进行两次高温去应力;在磨削后进行低温去应力(时效)。

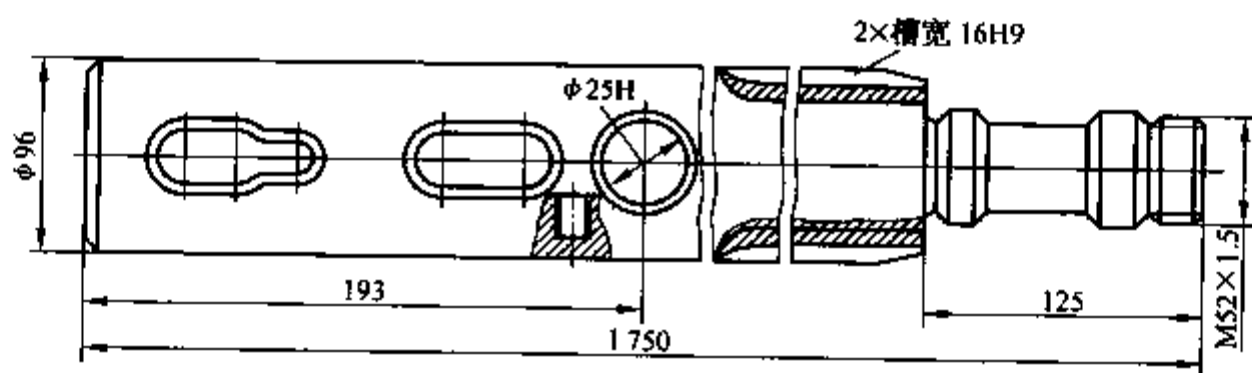


图 7-4 专用数控镗床镗杆零件图

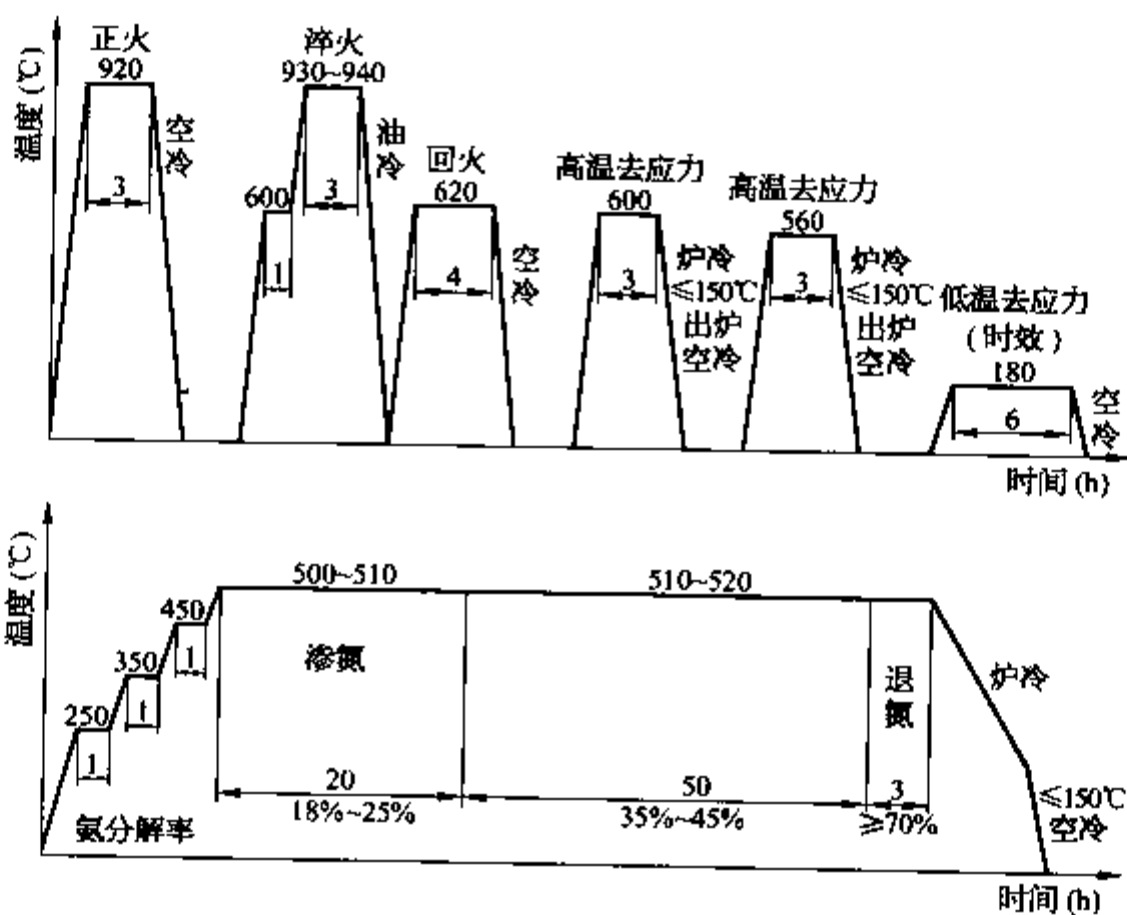


图 7-5 镗杆热处理工艺

镗杆渗氮层深度要求 0.4~0.6 mm; 渗氮层表面硬度  $\geq 900$  HV; 渗氮层脆性  $\leq 1$  级; 不直度  $\leq 0.05$  mm。采用阶梯缓慢升温, 经过渗氮—退氮处理后, 镗杆随炉冷至  $\leq 150^\circ\text{C}$  出炉空冷。

## 2. 机床主轴的热处理

1) M1350 万能外圆磨床头架主轴(图 7-6) 材料为 20Cr, 要求渗碳深度 0.9~1.4 mm, 淬回火后表面硬度 59~64 HRC, 径向跳动  $\leq 0.25$  mm。

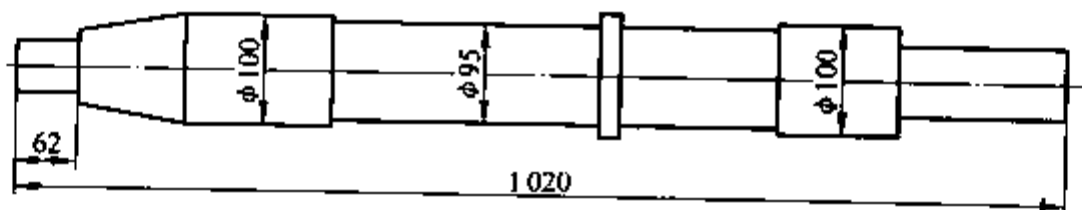


图 7-6 M1350 万能外圆磨床头架主轴

(1) 磨床主轴的制造工艺流程: 锻造—车—渗碳—校直—局部车削去碳—整体淬火—校直—车螺纹—钻孔、攻螺纹—粗磨—低温时效—精磨、研磨至尺寸。

(2) 热处理工艺。

气体渗碳:  $930^\circ\text{C}$  保温 6.5 h 渗碳后炉冷至  $650^\circ\text{C}$  出炉空冷。

盐浴炉淬火:  $790^\circ\text{C}$  保温 25 min, 淬盐水 8 s 后转入油冷;



回火: 160℃保温 8 h 后空冷。

低温时效: 160℃保温 10 h 后空冷。

该轴也可用 9Mn2V 制造, 调质要求硬度 235~265 HB; 标注直径的各档轴颈及锥部表面中频感应淬火, 硬度  $\geq 60$  HRC, 硬化层深度  $\geq 4$  mm。

(3) 9Mn2V 制造的主轴工艺流程: 锻造—球化退火—粗车—调质—精车—表面淬火—粗磨—低温时效—精磨、研磨至尺寸。

(4) 热处理工艺。

球化退火: 770~790℃保温 4 h 炉冷至 750~770℃保温 6 h, 炉冷至 500℃出炉空冷。

调质: 810℃保温 2 h, 淬油冷透; 高温回火 650℃保温 5 h 后空冷。

表面中频淬火 (ZP-100/2 500 Hz): 各轴档采用不同规格的感应线圈加热—喷水冷却。

低温回火、校直、时效: 160℃保温 6 h 后空冷。校直至径向跳动  $\leq 0.25$  mm, 再进行 160℃保温 10 h 时效。

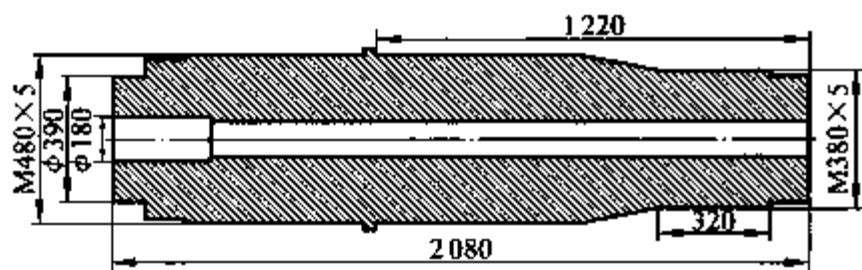


图 7-7 MK84200/12000 数控轧辊磨床床头架主轴

2) MK84200/12000 数控轧辊磨床床头架主轴

(图 7-7) 材料为 42CrMo, 要求整体淬硬, 硬度  $\geq 42$  HRC。

(1) 轧辊磨床床头架主轴制造工艺流程: 锻造—粗车—正火—车削—钻孔、攻螺纹—整体淬火—精车—低温时效 I—粗磨—低温时效 II—精磨、研磨至尺寸。

(2) 热处理工艺。

正火: 880℃保温 5 h 后空冷。

淬火、回火: 550℃保温 2 h 后 870℃保温 2.5 h, 淬油, 当轴冷至 80~100℃立即回火。回火 280℃保温 8 h 后空冷。

时效: 低温时效 I, 200℃保温 12 h 后空冷。低温时效 II, 180℃保温 12 h 后空冷。

3) H155B 外圆磨床砂轮架主轴 (图 7-8) 材料为 38CrMoAlA, 调质要求硬度 250~280 HB; 渗氮层表面硬度  $\geq 900$  HV, 渗氮层深度 0.4~0.55 mm。

(1) 制造工艺流程: 锻造—退火—粗车—调质—车削、截取金相样品—精车—去应力—粗磨—渗氮—精磨—超精磨、研磨至尺寸。

(2) 热处理工艺。

退火: 840~870℃保温 5 h, 炉冷至 550℃出炉空冷。

调质: 930~950℃保温 3 h, 淬油冷透; 高温回火 620~650℃保温 5 h 后空冷。

去应力: 装炉温度  $\leq 350$ ℃, 升温速度  $\leq 50$ ℃/h, 620~650℃保温 10~12 h, 炉冷至 350℃出炉空冷, 冷却速度  $\leq 30$ ℃/h。完工后检验弯曲变形, 径向跳动  $\leq 1.5$  mm。

渗氮: 500~510℃保温 25 h (氮分解率 18%~25%), 510~520℃保温 25 h (氮分解率 40%~50%), 退氮 2 h (氮分解率  $\geq 80$ %), 炉冷至  $\leq 150$ ℃出炉空冷。当渗氮层脆性大于 3 级时, 须进行 400℃保温 6 h 的消除脆性处理。

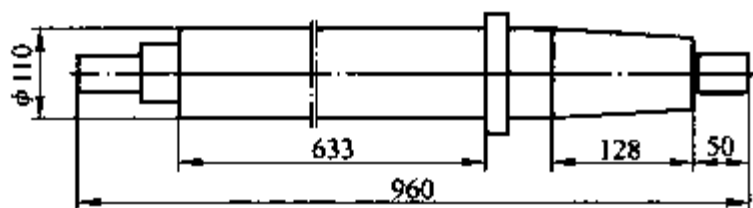


图 7-8 H155B 外圆磨床砂轮架主轴

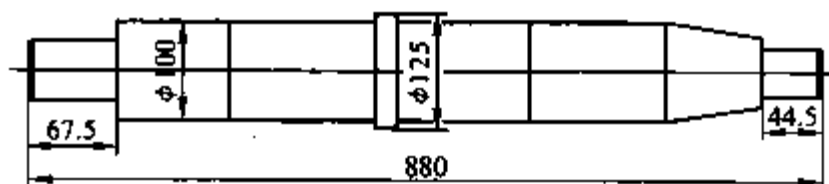


图 7-9 主轴 M7150 平面磨床砂轮架

4) M7150 平面磨床砂轮架主轴 (图 7-9) 材料为 65Mn, 热处理技术要求: 调质硬度 235~265 HB;  $\phi 125$ 、 $\phi 100$  及锥体表面淬硬, 硬度  $\geq 59$  HRC, 硬化层深度  $\geq 4$  mm。

(1) 平面磨床砂轮架主轴制造工艺流程: 锻造—退火—粗车—调质—车削—表面淬火—粗磨—低温时效—精磨、研磨至尺寸。

(2) 热处理工艺。

退火：800℃保温 3 h，炉冷至 550℃出炉空冷。

调质：810℃保温 2 h，淬油冷透；高温回火 630℃保温 4 h 后空冷。

中频(ZP-100/2 500 Hz)表面淬火：需表面淬火的各档采用感应线圈加热—喷水冷却。

低温回火：160℃保温 4 h 后空冷。

低温时效：160℃保温 10 h 后空冷。

5) T615K 镗床主轴(图 7-10) 材料为 38CrMoAlA，调质要求硬度 220~260 HB；表面硬度≥900 HV。

(1) 镗床主轴制造工艺流程：锻造—退火—粗车—调质—车(截取金相样品，检查合格后转精车)—精车外圆及锥孔(切渗氮试样)—粗刨键槽—校直/除应力—粗磨外圆、键槽、锥孔—渗氮—精磨—超精磨研磨至尺寸。

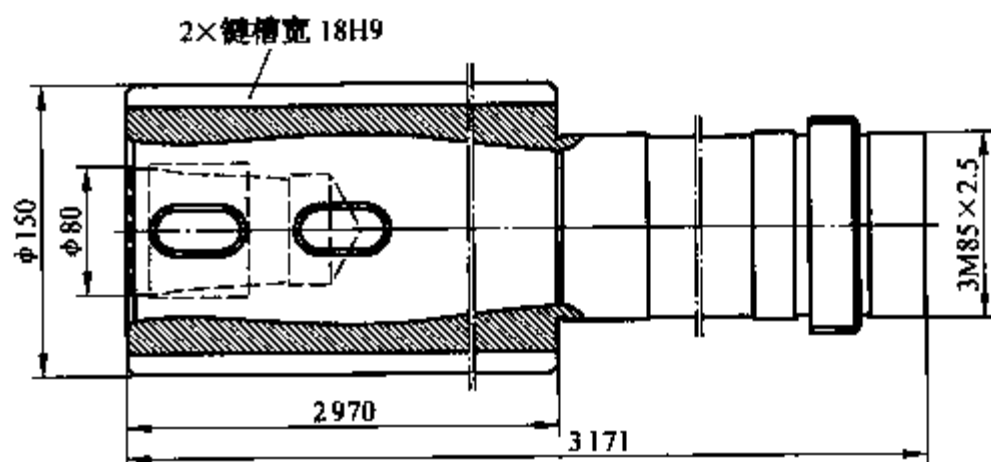


图 7-10 T615K 镗床主轴

(2) 热处理工艺。

退火：840~870℃保温 5 h，炉冷至 550℃出炉空冷。

调质：主轴装炉温度≤350℃，≤50℃/h 升温至 930~950℃保温 90 min，淬油冷透；高温回火 620~650℃保温 5 h 后空冷。

校直去应力：径向跳动≤1.0 mm。校直的轴须经 620~650℃保温 10~12 h 去应力处理，炉冷≤30℃/h 至 150℃出炉空冷。

渗氮：500~510℃保温 20 h(氮分解率 18%~25%)，510~520℃保温 70 h(氮分解率 40%~50%)，退氮 2 h(氮分解率≥80%)，炉冷至≤150℃出炉空冷。当渗氮层脆性大于 3 级时，须进行 400℃保温 6 h 的消除脆性处理。

渗氮后的热校直：加热温度 300~400℃保温 10~12 h 后，炉冷至 150℃出炉空冷，径向跳动≤0.08 mm。

### 三、机床丝杆热处理

#### 1. M7150A 平面磨床梯形螺纹丝杆(图 7-11)

平面磨床梯形螺纹丝杆的材料为 9Mn2V，要求整体淬硬，硬度 56 HRC。

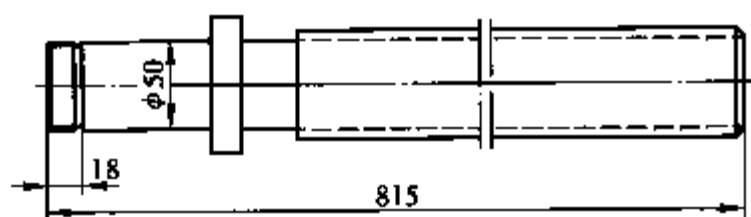


图 7-11 M7150A 平面磨床梯形螺纹丝杆

(1) 梯形螺纹丝杆制造工艺流程：锻造—球化退火—车—铣键槽、钻孔、攻螺纹—盐浴淬火—冷处理—中温回火—喷砂—粗磨—低温时效—精磨至尺寸。

(2) 热处理工艺。

球化退火：750~770℃保温 4 h 后降温至 680~700℃保温 6 h，炉冷至 500℃出炉空冷。

整体淬火及其他处理：淬火前 φ50 段用石棉、火泥包扎。450~550℃保温 1.5 h 后升温至 810℃保温 1 h，淬入 160℃硝盐浴，停留 5 min 后，取出进行热校直，径向跳动≤0.40 mm；随即进行-70℃保温 3 h 冷处理；随后中温回火 240℃保温 2 h 空冷；最后进行 160℃保温 24 h 的低温时效。

#### 2. S7332 螺纹磨床丝杆(图 7-12)

螺纹磨床丝杆的材料为 9Mn2V。调质要求硬度 220~250 HB；各档外圆及丝杆表面淬火，硬度 54~58 HRC。其中 T60 硬化层深度≥6 mm、硬度均匀性±2 HRC；中心孔淬火硬度≥52 HRC。

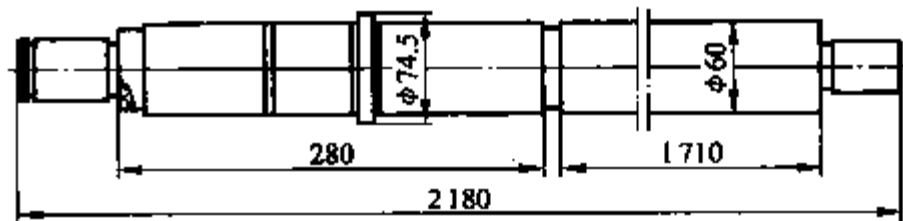


图 7-12 S7332 螺纹磨床丝杆

(1) 螺纹磨床丝杆制造工艺流程：锻造—球化退火—粗车—调质—校直去应力—半精车外圆—去应力—

中心孔淬火—精车外圆、铣键槽—表面淬火—冷处理—中温回火—粗磨—磁粉探伤—低温时效 I—研中心孔—半精磨外圆及螺纹—低温时效 II—研中心孔—精磨外圆及螺纹—精研中心孔—超精磨外圆及螺纹至尺寸。

(2) 热处理工艺。

球化退火：750~770℃保温 4 h 后降至 680~700℃保温 6 h，炉冷至 500℃出炉空冷。

调质：810℃保温 2 h，淬入 40~80℃油冷却；高温回火 650℃保温 5 h，炉冷至 350℃出炉转入冷却桶。

校直去应力：径向跳动 $\leq 4.0$  mm，校直后进行 630℃保温 5 h 去应力处理。

精车前去应力(来件径向跳动 $\leq 0.25$  mm)：620℃保温 5 h，炉冷至 350℃出炉转入冷却桶；去应力后径向跳动 $\leq 1.0$  mm。

中心孔淬火：加热温度约 830℃，油冷。

中频(ZP-100/2 500 Hz)表面淬火：各轴档及丝杆采用不同规格的感应线圈加热—喷水冷却。

低温回火：180℃保温 4 h，空冷。

校直：径向跳动 $\leq 0.70$  mm。

冷处理：-70℃保温 3 h。

中温回火：240℃保温 8 h，炉冷。

低温时效 I：200℃保温 12 h 后空冷(径向跳动 $\leq 0.20$  mm，时效后径向跳动 $\leq 0.40$  mm)。

低温时效 II：180℃保温 12 h 后空冷(径向跳动 $\leq 0.10$  mm，时效后径向跳动 $\leq 0.15$  mm)。

### 3. 数控磨齿机滚珠丝杆(图 7-13)

YKA7232/H 数控磨齿机滚珠丝杆的材料 GCr15。热处理技术要求：整体淬火硬度 $\geq 59$  HRC。

(1) 数控磨齿机滚珠丝杆制造工艺流程：圆钢—车—淬火—热校—冷处理—回火—粗磨—低温时效—精磨至尺寸。

(2) 热处理工艺。

淬火及热校：盐浴加热 840℃保温 16 min，淬硝盐冷 3 min 取出空冷。热校直，径向跳动 $\leq 0.25$  mm。

冷处理及回火：-70℃保温 30 min 后空冷，160℃低温回火保温 4 h 后空冷。

低温时效：160℃保温 12 h 空冷。

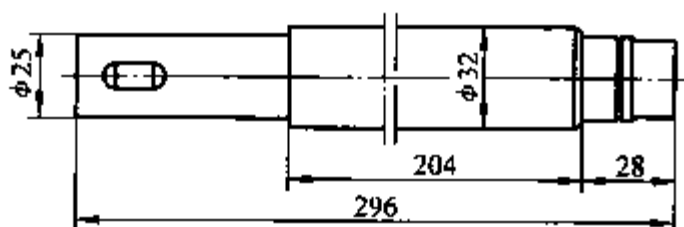


图 7-13 YKA7232 数控磨齿机丝杆

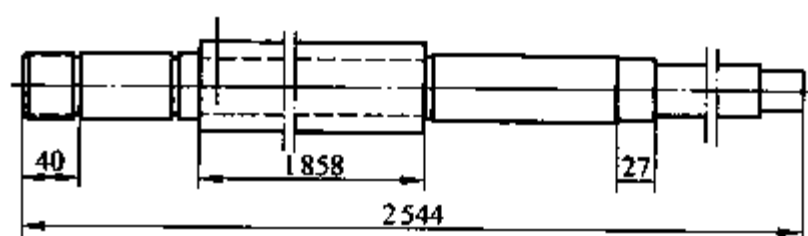


图 7-14 MKQ13125/H 数控外圆磨床丝杆

### 4. MKQ13125/H 数控外圆磨床滚珠丝杆(图 7-14)

数控外圆磨床滚珠丝杆的材料为 GCr15。热处理技术要求：调质硬度 220~250 HB；各轴档外圆及方头表面淬硬，硬度 58~62 HRC，淬硬层深度 $\geq 3$  mm；中心孔硬度 $\geq 52$  HRC。

(1) 数控外圆磨床滚珠丝杆制造工艺流程：球化退火—粗车—调质—校直—去应力—中心孔淬火—半精车—去应力—精车—中频淬火—热校直—冷处理—低温回火—粗磨—低温时效—精磨至尺寸。

(2) 热处理工艺。

球化退火：780~800℃保温 4 h，降至 680~700℃保温 6 h 后炉冷至 350℃出炉，转入冷却桶。

调质校直去应力：850℃保温 3 h，淬入 40~80℃油冷却；650~680℃高温回火保温 4 h，出炉转入冷却桶；随后校直(径向跳动 $\leq 0.25$  mm)；校直去应力 610~630℃保温 5 h，炉冷至 350℃出炉转入冷却桶。

中心孔淬火：加热温度约 840℃，油冷。

中频(ZP-100/2 500 Hz)表面淬火——各轴档采用不同规格的感应线圈加热—喷水冷却。

校直：径向跳动 $\leq 0.45$  mm。

冷处理：-70℃保温 1 h。

低温回火：180℃保温 8 h 后空冷。

低温时效：160℃保温 12 h 后空冷。

## 第二节 汽车、拖拉机及动力机械零件热处理

### 一、汽车、拖拉机零件热处理

#### 1. 汽车、拖拉机变速器齿轮热处理

1) 服役条件及失效形式 汽车、拖拉机变速器齿轮，在传递动力的过程中，齿面之间既有滚动摩擦又有滑动摩擦。传递的扭矩从几十牛·米到几千牛·米；整齿在啮合过程中承受交变应力的作用，既承受接触疲劳，又承受弯曲疲劳。

啮合齿轮齿面间的相对摩擦，易造成齿面的磨损，如果齿轮的表面硬度过低或存在网状碳化物，交变的接触应力会引起齿面点蚀剥落。齿的断裂是由弯曲应力引起的，主要发生在齿根，有过载断裂和疲劳断裂。

#### 2) 齿轮材料的选择

(1) 渗碳淬火的变速器齿轮的材料为钢，可根据传递的扭矩大小、渗层的厚度来选择。

(2) 齿轮坯的锻造及预备热处理：齿轮用锻造制坯，可以破碎基体的铸态组织，细化晶粒，均匀组织，锻合缩孔、气孔、疏松等缺陷，显著改善锻件的内部质量。预备热处理常采用调质处理或正火处理。

(3) 变速器齿轮的热处理质量控制：主要是控制齿面的硬度、渗碳淬火硬化层（简称淬硬层深度）、心部硬度、渗碳层的组织和心部组织等。

① 齿面硬度一般为 58~63 HRC。为了防止磨削裂纹，以 58~61 HRC 为宜。

② 淬硬层深度。按 GB/T9450《钢件渗碳淬火硬化层深度的测定校核》，一般为表面至 550 HV1 的距离，也可以根据不同的材料使用不同的界限值，如 630 HV1、600 HV1、513 HV1 等。理想的渗碳齿轮的表面硬化层曲线是由高到低的平缓抛物线，在保证齿面硬度不低于 58 HRC 的条件下，适当提高回火温度和延长保温时间，可以充分消除淬火残留应力，有利于减少齿轮的磨削裂纹。

③ 渗碳层的显微组织。马氏体与残留奥氏体 1~5 级合格，残留奥氏体量小于 30%，碳化物 1~4 级合格。心部组织为低碳马氏体或下贝氏体+少量游离铁素体，1~4 级合格；心部硬度为 30~40 HRC。

齿轮在渗碳缓冷或空冷后有残留奥氏体存在时，在淬火前必须进行充分的高温回火，使残留奥氏体充分转变。残留奥氏体在 5 级(30%)以上时，对接触疲劳、弯曲疲劳强度均没有好处。

#### 2. 轿车变速器前驱主传动齿轮热处理

轿车变速器前驱主传动常啮合齿轮，精度和噪声要求很高。齿轮简图见图 7-15。

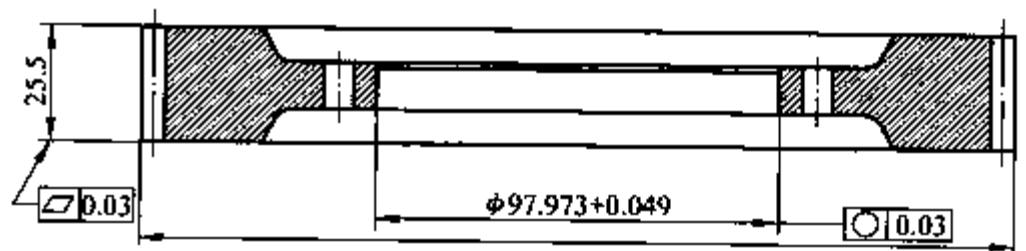


图 7-15 轿车变速器前驱主传动齿轮简图

1) 技术要求 表面硬度：680~780 HV1。淬硬层深度：550 HV1 深度

为 0.7~1.0 mm (CHD=0.7~1.0 mm)。渗碳层显微组织：碳化物 1~4 级+针状马氏体 1~5 级+残留奥氏体 2~5 级。心部显微组织：板条状马氏体+少量贝氏体(不允许存在条状或块状铁素体)。心部硬度：400~500 HV1。畸变：(模压淬火后)平面 $\leq 0.03$  mm，孔径椭圆 $\leq 0.03$  mm。

2) 材料及化学成分 材料：TL4521(相当于国内的 20CrNi2Mo)，见表 7-2。

表 7-2 TL4521 钢化学成分

(质量分数，%)

C	Mn	Cr	P	S	Si	Ni	Mo	Al	Ti
0.15~ 0.23	0.5~ 0.8	0.65~ 0.85	$\leq 0.035$	0.025~ 0.035	$\leq 0.12$	1.5~ 1.9	0.28~ 0.38	0.015~ 0.040	$\leq 0.0050$

3) 制造工艺流程 冷挤压—等温正火—精车—切齿、铣花键—渗碳—压淬—回火—喷丸—磨齿(成品)。

4) 热处理工艺

(1) 预备热处理。

技术要求：硬度 156~207 HB, 同一批产品硬度差小于 25 HB。

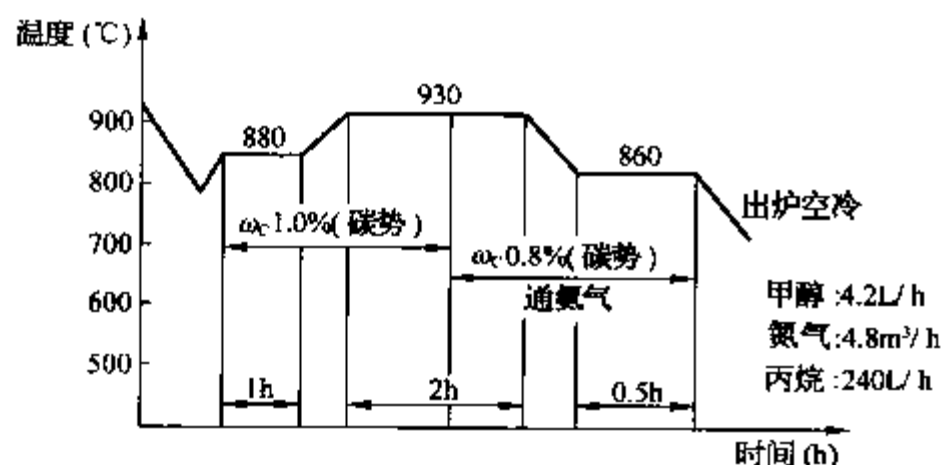


图 7-16 渗碳工艺曲线(后期另加氮气 0.1~0.2 m³/h)

基体组织：珠光体(非等轴状的珠光体小于 30%) + 铁素体(无魏氏组织、贝氏体等其他有害组织); 带状组织 ≤ 2 级。

淬透性：J9=33~37 HRC。

预备热处理工艺：等温正火(920°C 保温，风冷到 600°C 等温 30 min 空冷)。

(2) 最终热处理。

采用箱式多用炉渗碳(后期通氮)，转底炉加热后用格利森压机模压淬火，以保证产品平面度和孔径尺寸要求。渗碳工艺曲线见图 7-16, 压淬工艺曲线见图 7-17。最终热处理工艺见表 7-3。

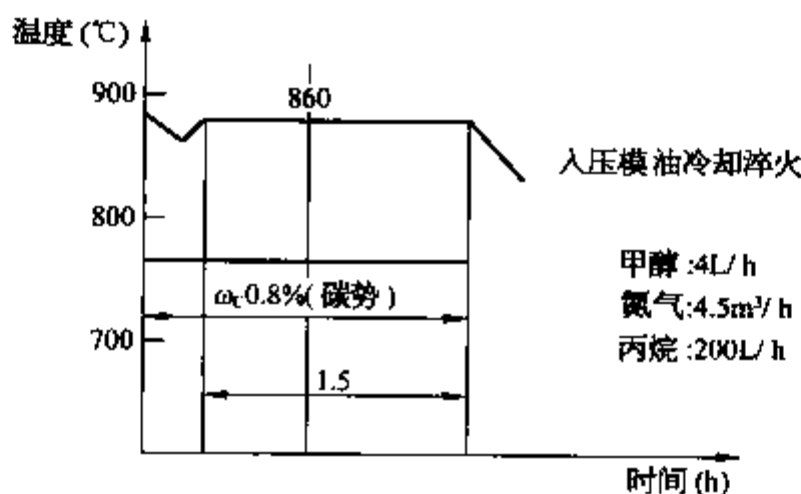


图 7-17 压淬工艺曲线

表 7-3 传动齿轮最终热处理工艺

工序	温度(°C)	时间(h)	设备	介质
预热	180	0.5	回火炉	空气
渗碳	详见图 7-16		箱式多用炉	甲醇+氮气+丙烷 (后期通氮气)
压淬	860	1.5	转底炉、格利森压机	70°C 快速淬火油
回火	170	3	回火炉	

3. 客车螺伞主动轴热处理

客车螺伞主动轴材料为 21NiCrMo5H(近似国内 20CrNiMo 钢)。

1) 技术要求 表面硬度：680~780 HV1, 心部硬度：350~480 HV1。淬硬层深度：550 HV1 深度为 0.8~1.1 mm。齿面显微组织：按 QC/T262—1999 标准评定, 碳化物(1~5 级) + 针状马氏体(1~5 级) + 残留奥氏体(1~5 级)。心部显微组织：板条状马氏体 + 少量贝氏体(不允许存在条状或块状铁素体)。

2) 材料及化学成分 材料为 21NiCrMo5H, 化学成分见表 7-4。

表 7-4 21NiCrMo5H 钢化学成分

(质量分数, %)

C	Mn	P	S	Ni	Si	Cr	Cu	Mo	Al
0.19~0.23	0.60~0.90	≤0.035	0.02~0.04	1.20~1.50	0.20~0.35	0.70~1.00	≤0.20	0.15~0.25	0.02~0.05

3) 螺伞主动轴制造工艺流程 冷挤压成形—等温正火—精车、铣齿—渗碳淬火—回火—喷丸—研磨配对—啮合检查(接触区,噪声)。

4) 热处理

(1) 预备热处理。

技术要求: 经等温正火(920℃保温后风冷到 600℃等温 30 min 空冷), 硬度 160~190 HB, 同一件产品硬度差小于 5 HB, 同一批产品硬度差小于 15 HB。抗拉强度 $\leq 790 \text{ N/mm}^2$ 。

基体组织: 均匀分布的珠光体和铁素体(无魏氏组织、贝氏体等其他组织); 带状组织 $\leq 2$ 级。

淬透性: J3=42~49 HRC, J15=32~41 HRC。

(2) 最终热处理。

最终热处理工艺见表 7-5 和图 7-18, 采用箱式多用炉进行渗碳、热油淬火、冷处理。

表 7-5 螺伞主动轴热处理工艺

工序	温度(℃)	时间(h)	设备
预热	180	0.5	回火炉
渗碳淬火	详见图 7-18		箱式多用炉
冷处理	-30	3	低温箱
回火	170	3	回火炉

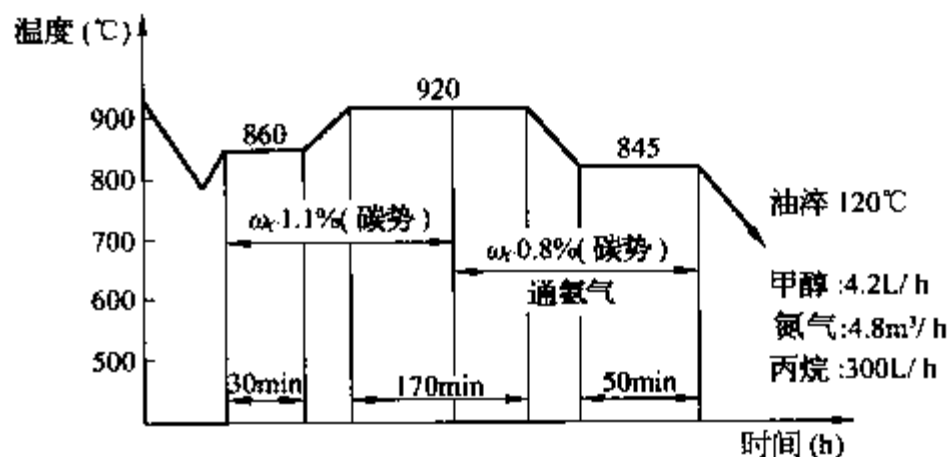


图 7-18 螺伞主动轴渗碳淬火工艺曲线

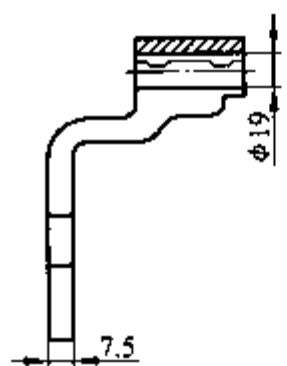


图 7-19 重型卡车变速器换挡拨叉

4. 重型卡车变速器换挡拨叉热处理

重型卡车变速器换挡拨叉见图 7-19, 脚面变形要求高, 跳动要求 $\leq 0.05 \text{ mm}$ , 采用浅层渗碳淬火。

1) 技术要求 表面锉刀硬度达 62 级(相当于 61~63 HRC)。淬硬层深度: 513 HV1 深度为 0.13~0.30 mm(CHD513=0.13~0.30 mm)。渗碳层显微组织: 碳化物(1~4 级)+针状马氏体(1~5 级)+残留奥氏体(1~5 级)。心部显微组织: 板条状马氏体+少量贝氏体(不允许存在条状或块状铁素体)。振动疲劳试验:  $\geq 30\,000$  次。

2) 材料及化学成分 材料为 8620H(相当国内 20CrNiMo 钢), 见表 7-6; 带状组织 $\leq 2$ 级。

表 7-6 8620H 钢的化学成分

(质量分数,%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ti	Ni	Mo	Al
0.18~0.23	0.15~0.35	0.70~0.90	$\leq 0.035$	0.020~0.035	0.40~0.60	$\leq 0.35$	$\leq 0.02$	0.40~0.70	0.15~0.25	0.015~0.045

3) 变速器换挡拨叉制造工艺流程 模锻—等温正火—车孔、铣平面—渗碳淬火—回火—喷丸—珩孔—校正—探伤成品。

4) 热处理

(1) 预备热处理。

技术要求: 经等温正火(920℃保温 100 min 后, 风冷到 630℃等温 240 min 空冷), 晶粒度 5~8 级。硬度 163~241 HB, 同一件产品硬度差小于 5 HB, 同一批产品硬度差小于 20 HB。

基体组织: 细片状珠光体+铁素体(无魏氏组织, 允许少量贝氏体组织)。

淬透性: J4.8=35~41 HRC, J7.9=26~34 HRC, J12.7=21~28 HRC。

(2) 最终热处理工艺,见表 7-7 和图 7-20。

表 7-7 换挡拨叉热处理工艺

工 序	温度(°C)	时间(h)	设 备
预 热	180	0.5	回火炉
碳氮共渗淬火	详见图 7-20		箱式多用炉
回 火	170	3	回火炉

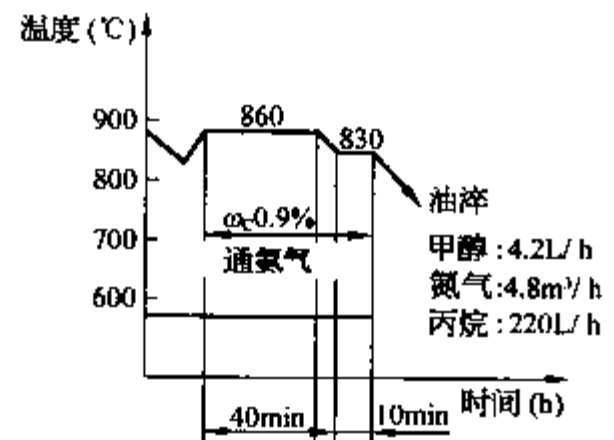


图 7-20 换挡拨叉渗碳淬火工艺曲线图

### 5. 变速器输入轴热处理

该产品是汽车变速器主轴,见图 7-21。轴长 571.6 mm,径向跳动要求 $\leq 0.05$  mm。测量位置见图中 1、2、3、4 指示处。

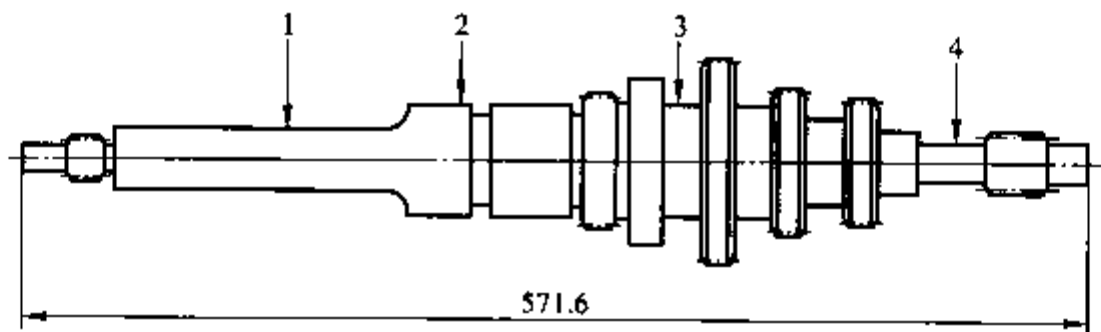


图 7-21 输入轴简图

1) 热处理技术要求 表面硬度: 680~780 HV1; 心部硬度: 350~480 HV1。淬硬层深度: 630 HV1 深度为 0.4~0.65 mm。渗碳层显微组织: 碳化物(1~4 级)+针状马氏体(1~5 级)+残留奥氏体(1~5 级)。心部显微组织: 板条状马氏体+少量贝氏体(不允许存在条状或块状铁素体)。

2) 材料及化学成分 材料: TL4129 (近似国内 28CrMn 钢),见表 7-8。

表 7-8 TL4129 钢化学成分

(质量分数,%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Mo	Ni
0.25~0.30	$\leq 0.12$	0.60~0.80	$\leq 0.035$	0.020~0.035	0.80~1.00	0.020~0.055	$\leq 0.10$	$\leq 0.15$

3) 变速器主轴制造工艺流程 冷挤压—等温正火—精车—切齿、铣花键—低压真空渗碳、淬火—回火—喷丸—校直(成品)。

#### 4) 热处理

##### (1) 预备热处理。

技术要求: 经等温正火(900°C 保温 120 min 后风冷到 600°C 等温 300 min 空冷), 晶粒度 5~8 级; 硬度 156~207 HB, 同一批产品硬度差小于 25 HB。

基体组织: 均匀分布的珠光体和铁素体(无魏氏组织、贝氏体等其他组织); 带状组织 $\leq 2$  级。

淬透性: J10=28~35 HRC。

##### (2) 最终热处理。

该轴变形要求高, 采用低压真空渗碳淬火生产线进行渗碳淬火。在低压 600~1 000 Pa 真空状态下按工艺节拍[通入丙烷+扩散(通入氮气的过程)], 进行脉冲式渗碳达到渗层要求, 然后炉冷到 870°C 保温一段时间后油淬。输入轴的最终热处理工艺见表 7-9 和图 7-22。

表 7-9 输入轴最终热处理工艺

工 序	温 度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	时 间 (h)	设 备
预 热	180	0.5	回火炉
真空渗 碳淬火	详见图 7-22		低压真空 渗碳炉
回 火	170	3	回火炉

## 二、动力机械零件热处理

### 1. 发动机曲轴的热处理

1) 发动机曲轴的服役条件和失效形式 曲轴在内燃机上将活塞-连杆组件的往复运动转变为旋转运动, 实现内燃机功率的输出。曲轴在运动中承受着复杂的应力, 主要表现为周期性变化的气缸内燃油爆燃做功后, 曲轴高速旋转并承受交变弯矩和扭矩、一定的冲击以及轴颈的磨损等。曲轴的强化主要针对本体性能和轴颈表面尤其是圆角部位, 以期提高曲轴的耐磨性能和疲劳强度。曲轴的主要失效形式为疲劳断裂和磨损。

2) 曲轴用材料与力学性能 制造高速内燃机曲轴的材料有钢(调质钢和非调质钢)和球墨铸铁两大类。部分内燃机曲轴用调质钢与力学性能要求见表 7-10。

表 7-10 部分内燃机曲轴用调质钢及其力学性能要求

材 料	力 学 性 能					硬 度 HB	最 终 表 面 强 化 方 法
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)	$a_k$ ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )		
42CrMo	860	700	12	50	—	205~302	调质
42CrMo	—	490	13	—	58.5	241~300	调质
42CrMoA	800	640	14	45	78	251~306	调质、气体氮碳共渗
40CrNiMoA	1 080	930	15	50	78.5	280~320	调质
CK45、50						200~240	正火、氮碳共渗、圆角滚压
39Cr5	800	600	14	—	—	270~306	调质、轴颈及圆角中频淬火
SAE1548	760	480	18	40	—	241~285	1) 调质、轴颈及圆角中频淬火 2) 调质、轴颈中频淬火圆角滚压
45						207~241	调质、中频轴径淬火
40Cr	—	588	13	—	58.5	240~302	调质、中频轴径淬火
35CrMo	740	540	12	40	43		调质

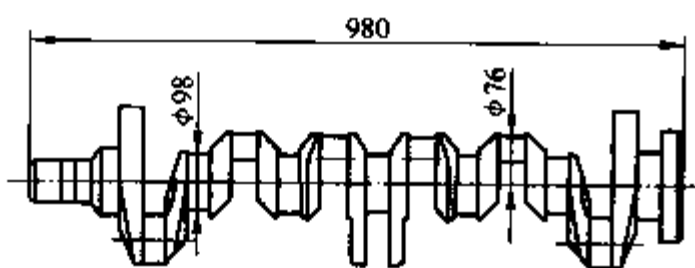


图 7-23 某六缸直列式柴油机曲轴简图

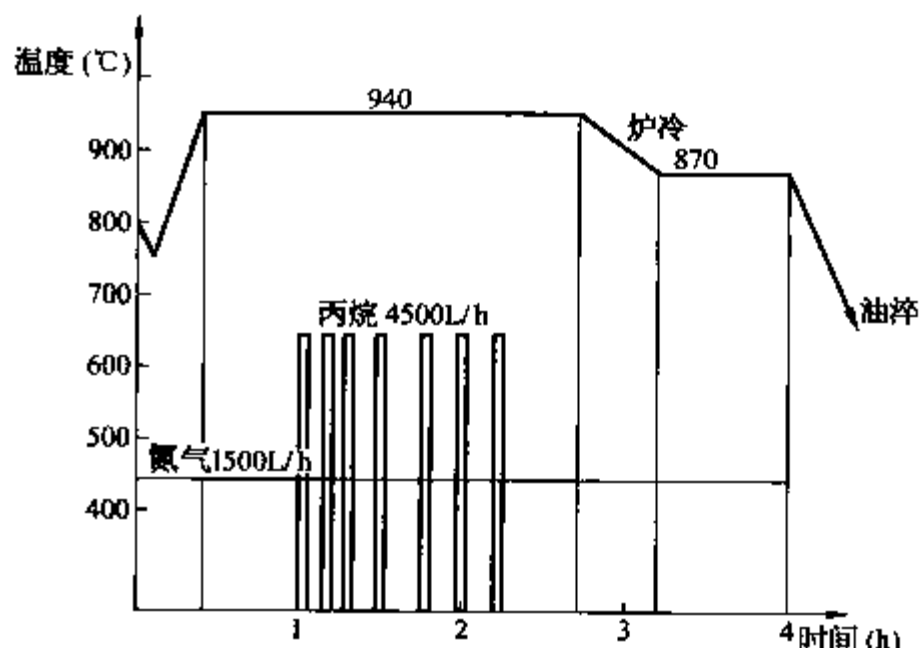


图 7-22 真空渗碳淬火工艺曲线

3) 钢质曲轴的热处理 以 42CrMoA 钢制六缸直列式柴油机曲轴为例(图 7-23), 其性能要求见表 7-10。

(1) 曲轴制造工艺流程为: 圆钢下料—热模锻—正火—调质处理—粗加工—轴颈表面强化处理—精加工—荧光磁粉探伤—成品。

(2) 热处理工艺。

① 曲轴的正火。正火的目的是细化锻件晶粒, 为调质



处理做好组织准备。正火在周期式电炉(或连续式炉)中进行,加热温度为 $(890 \pm 10)^\circ\text{C}$ ,保温 2.5 h 后出炉散开自然空冷。

② 曲轴的调质处理。调质在连续式电炉中进行,电炉分段控温。曲轴连续进料的节拍根据有效保温时间(1.5 h)决定。保温区温度 $(870 \pm 10)^\circ\text{C}$ ;淬火介质选用聚乙烯醇水溶液(浓度为 0.4%~0.5%,温度为 20~45 $^\circ\text{C}$ ),曲轴在介质中停留 14~18 min 后出水,进入连续式电炉回火。回火电炉分段控温 $(540 \pm 20)^\circ\text{C}$ ,连续进料的节拍根据有效保温时间决定,全部升温—保温时间 330 min。调质后的畸变可进行冷校直,但校直后必须在低于回火温度 20~30 $^\circ\text{C}$ 的温度进行去应力处理;不允许在曲轴机械加工的工序间进行校直。

③ 非调质钢曲轴的控制锻造和控制冷却:用非调质钢制造曲轴,应严格控制曲轴锻造加热温度,锻后控制在 750~450 $^\circ\text{C}$ 区间以 5~7 $^\circ\text{C}/\text{min}$ 的冷却速度降温,获得珠光体+铁素体混合组织,不经调质处理而获得与调质处理一样的力学性能。三种热锻用非调质结构钢的一般力学性能要求见表 7-11。

表 7-11 三种热锻用非调质结构钢的一般力学性能要求

钢 号	力 学 性 能 $\geq$				硬度 HB
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)	
49MnVS3	780	480	15	35	229~285
48MnV	689	449	18	40	235~277
30MnSiV	785	490	15	40	240~275

④ 轴颈表面强化处理:轴颈及圆角中频感应淬火(淬硬层深度:轴颈 2.5 mm,圆角 1.5 mm);表面硬度 50~56 HRC。中频感应淬火在全自动淬火机床上进行,带圆角淬火的半环形喷液型感应器“骑”在轴颈上,随曲轴旋转而动。

某 42CrMo 曲轴,淬火加热温度 860~900 $^\circ\text{C}$ ,加热约 10~15 s 不等,后随即喷水冷却,淬火硬度 55 HRC,回火 340~360 $^\circ\text{C}$ 保温 4 h 后出炉空冷。轴颈淬硬层深度 2~4 mm,圆角 45 $^\circ$ 淬硬层 $\geq 1.50$  mm。感应淬火后的畸变,应在淬火后立即校正并随即回火。禁止对表面强化后的曲轴进行冷校直。

有的大功率高速柴油机曲轴,因尺寸大,曲轴调质处理和机加工后,可用胶带缠绕轴颈进行保护,对圆角进行喷丸强化处理。

⑤ 曲轴的气体氮碳共渗处理(渗层深度 $\geq 0.30$  mm,表面 $\geq 500$  HV0.1);一般在 RJJ-105 井式渗碳炉中进行,工艺曲线见图 7-24。许多企业用离子渗氮方法完成表面强化。

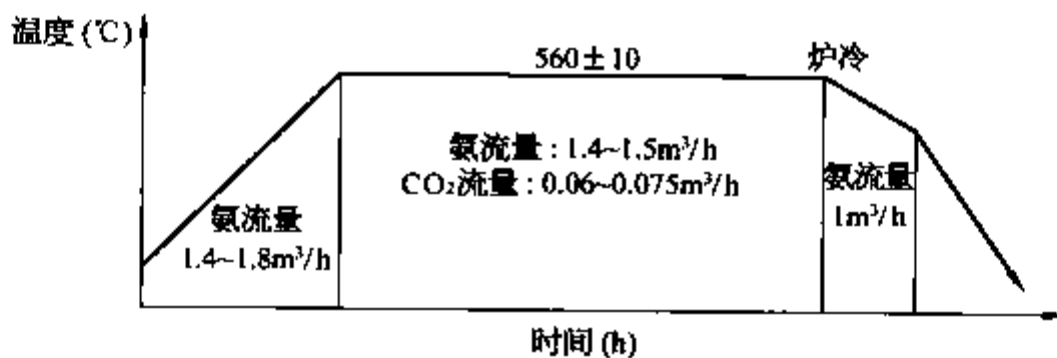


图 7-24 42CrMoA 曲轴气体氮-碳共渗工艺曲线

4) 球墨铸铁曲轴的热处理 球墨铸铁经正火处理后,基体组织以珠光体为主,具有不亚于中碳结构钢的强度,其耐磨性、减振性、缺口敏感性优于锻钢,而球墨铸铁曲轴的成本仅为锻钢的 50%~70%。国内柴油机用球铁曲轴,小到 485、490 型柴油机,大到东风 4D 型内燃机车用 16V240ZJD 型柴油机,功率从几十千瓦到数千千瓦,充分体现出球墨铸铁材料与性能的优势。部分内燃机曲轴用铸铁与力学性能要求见表 7-12。

表 7-12 部分内燃机曲轴用铸铁及其力学性能要求

材料牌号	热处理工艺及性能要求
QT850-3、 QT800-3	正火 240~300 HB; 气体氮碳共渗, 渗层深度 $\geq 0.20$ mm, $\geq 500$ HV0.1 轴颈圆角滚压强化
QT800-2	正火 229~302 HB; 盐浴氮碳共渗, 渗层深度 $\geq 0.15$ mm, $\geq 500$ HV0.1
QT800-2	正火 240~280 HB; 各轴径感应淬火; 或整体氮碳共渗, 渗层深 0.1~0.3 mm, $\geq 500$ HV0.1
QT700-3	正火 229~302 HB

曲轴用球墨铸铁的主要性能指标为抗拉强度,  $R_m$  一般要求 $\geq 700$  MPa、 $\geq 800$  MPa、 $\geq 850$  MPa、 $\geq 900$  MPa不等, 断后伸长率一般要求 $\geq 3\%$ 。对组织的要求较严格, 如球化级别 $\geq 2$ 级, 即球化率 $\geq 90\%$ ; 石墨大小6~8级, 即石墨球的直径 0.06 mm; 珠光体量 $\geq 80\%$ ; 游离碳化物+磷共晶 $\leq 3\%$ , 其中磷共晶 $\leq 1.5\%$ 等。

球墨铸铁曲轴的表面强化方法, 主要有气体(或液体)氮碳共渗、离子渗氮, 以及氮碳共渗+圆角滚压强化、轴颈中频感应淬火+圆角滚压强化等。曲轴的气体氮碳共渗在井式气体渗氮炉或井式气体渗碳炉中进行; 液体氮碳共渗在井式盐浴炉中进行; 离子渗氮在大型钟罩式离子轰击炉中进行, 曲轴直立装炉; 感应淬火及圆角滚压在专用机床上进行。

5) 不同表面强化方法对曲轴疲劳强度的影响 曲轴的失效, 主要是磨损与疲劳断裂。如属于正常的磨损, 可以通过调配系列轴瓦后继续运行, 严重磨损的可经轴颈喷钢重新磨削后继续运行。曲轴的表面强化始终是围绕提高曲轴实物的疲劳强度这一主题。所有的曲轴表面强化方法, 都是为了在轴颈表面尤其是圆角部位形成有效的压应力层。

经验表明, 各种表面强化方法对提高曲轴疲劳强度的贡献, 从小到大依次为: ① 离子渗氮; ② 气体氮碳共渗; ③ 液体氮碳共渗; ④ 轴颈感应淬火复合圆角滚压强化; ⑤ 轴颈与圆角感应淬火。

## 2. 内燃机连杆的热处理

发动机的连杆将活塞的直线往复运动, 转变为曲轴的旋转运动, 其在工况下的基本负荷是承受压缩与拉伸的交变载荷。连杆的设计须保证连杆具有足够的疲劳强度与结构刚度, 强度不足, 连杆易断裂; 刚度不足, 连杆易变形。

1) 连杆常用的材料与力学性能 连杆均采用优质的中碳碳素结构钢或中碳合金结构钢制造, 如 45、40Cr、40MnBH、42CrMo, 以及中碳、高碳的非调质钢等。几种机型的连杆材料与性能见表 7-13。

表 7-13 几种机型的连杆材料与力学性能要求

材 料	力学性能 $\geq$					硬度 HB
	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z(%)	$A_k$ (J)	
40Cr	754	588	11	40	横向 29, 纵向 59	233~280
42CrMo	860	620	16	50	横向 34, 纵向 74	266~302
40MnV	862	621	15	45	—	266~302
40MnBH	930	620	15	47	—	287~298
38MnVS	918	—	15.2	—	—	222~283
C70S6	900~1 050	520	10	40	—	263~310

## 2) 连杆的热处理

(1) 以调质处理为最终热处理的制造工艺。其工艺流程为: 下料—热模锻—空冷—正火—清理—调质(淬火+回火)—强化抛丸—机械加工—成品。40Cr 连杆的热加工工艺曲线见图 7-25。

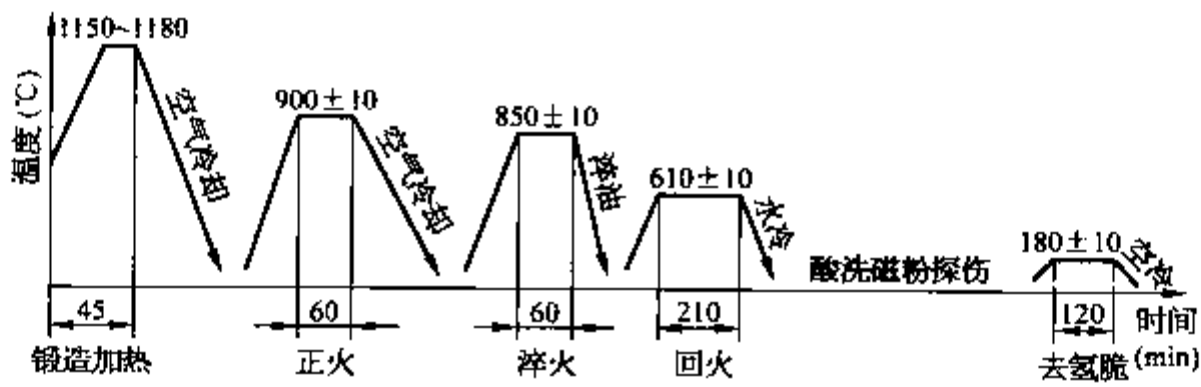


图 7-25 40Cr 连杆的热加工工艺曲线

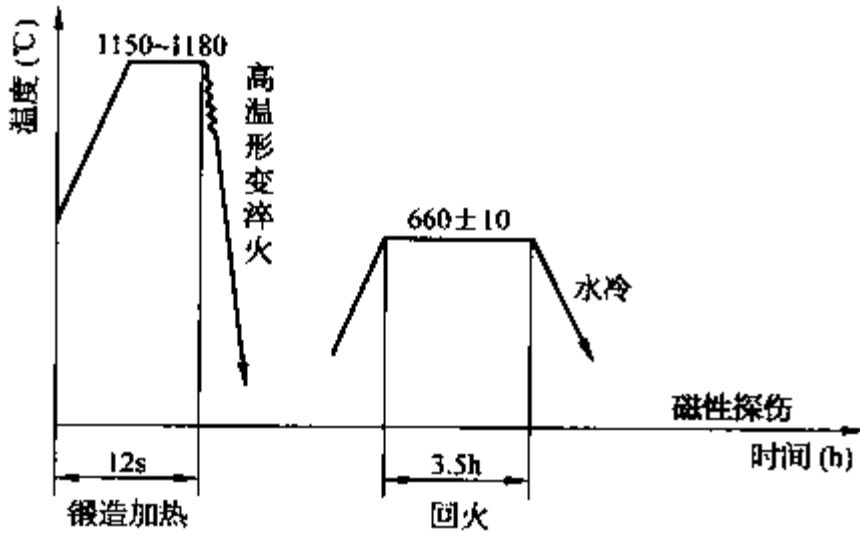


图 7-26 40Cr 连杆热加工(锻造余热淬火)工艺曲线

(2) 以锻造余热淬火回火为最终热处理的制造工艺。其工艺流程为：下料—热模锻—锻造余热淬火—高温回火—强化抛丸—机械加工—成品；热加工工艺曲线见图 7-26。坯料加热采用 1 000 Hz 中频感应加热，楔横轧制坯后经热模锻制坯，在连续式电炉中回火。

连杆模锻变形量为 30%~40%。锻造后空冷，再经正火处理，晶粒度一般为 5~6 级。而锻造余热淬火晶粒度 2~4 级，虽然晶粒粗了，但性能反而提高，这是因为锻造余热淬火获得了细板条状马氏体，特点是马氏体以大致相同尺寸的板条为单元，结合成定向排列的马氏体群，在一个奥氏体晶粒中，有多个不同取向的马氏体，这种组织

具有高强度和良好塑性与韧性的配合。表 7-14 为 40Cr 钢连杆调质处理与锻造余热淬火一回火后的力学性能对比。

表 7-14 40Cr 钢连杆调质处理与锻造余热淬火一回火后的力学性能对比

热处理工艺	力学性能					
	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	Z (%)	$A_k$ (J)	硬度 HB	安全系数
1 100℃锻造余热淬火， 620℃回火	891	20	65.5	204	270	2.04
850℃淬火 620℃回火	755	19	66	196	235	1.95

采用锻造余热淬火应注意的问题：

- ① 中碳结构钢锻造加热温度以 1 100~1 220℃为宜，温度偏高会导致锻造余热淬火温度提高，淬火晶粒粗大。
- ② 终锻温度即为淬火温度，应控制在 900~1 050℃。
- ③ 终锻后入油前的时间应控制(通过调节输送链带的速度)，防止停留时间过长，产生先析铁素体组织。
- ④ 连杆淬火介质油温 60~100℃，出油时连杆温度为 100~150℃。
- ⑤ 连杆淬火后应及时回火，防止放置时间过长而发生裂纹。
- ⑥ 连杆的表面强化抛丸很重要，抛丸后的连杆体应经常进行表面应力测试，应随抛丸连杆附带 Almen 试片，经常检测弧高度；并通过实物疲劳试验，对连杆的设计、选材与力学性能的可靠性进行评价。

### 3. 发动机凸轮轴的热处理

1) 凸轮轴的材料与热处理要求 凸轮轴为发动机配气机构的驱动轴，凸轮型线的精准度对发动机的工况有很大的影响，凸轮轴杆身承受较大的扭转载荷，并对凸轮的耐磨性要求很高。当今各种发动机常用的凸轮轴材料与性能要求见表 7-15。

表 7-15 凸轮轴的材料与性能要求

凸轮轴的材料		热处理工艺与性能要求
钢	渗碳钢 20、20Cr 等	渗碳(渗层深度 1.0~1.5 mm), 表面硬度 58~63 HRC, 硬化层深度 ≥ 0.5 mm。 1) 渗碳后整体淬火+低温回火 2) 渗碳后凸轮及轴承档中频感应淬火+低温回火
	中碳钢 40Cr、45、50、60 等	凸轮及轴承档中频感应淬火。表面硬度 58~63 HRC, 硬化层深度 ≥ 1.5 mm
铸	球墨铸铁 QT700-2、QT460H 等	球墨铸铁等温淬火, 硬度 42~51 HRC
	激冷铸铁	造型时在凸轮部位预置冷铁, 用灰铸铁(可含有 Cu、Cr、Mo 等合金元素) 浇铸时, 用冷铁加大局部冷却速度, 并形成白口层, 硬度 > 55 HRC, 不经热处理即可使用
铁	特殊铸铁	针对凸轮轴的工作, 对铸铁的化学成分与碳化物含量作出规定。如规定凸轮尖碳化物含量 > 20% (面积), 凸轮尖两侧 ± 45° 处以及凸轮基圆碳化物含量 > 10% 凸轮轴杆身硬度 245~321 HB, 凸轮及轴承档中频感应淬火—低温回火, 硬度 ≥ 57 HRC

2) 凸轮轴的热处理

(1) 20Cr 钢凸轮轴的整体渗碳—淬火—低温回火

某六缸发动机凸轮轴长 895 mm, 轴承档直径 φ46 mm, 轴身直径 φ35 mm。整体渗碳在 RJJ-105 或 RJJ-90 气体渗碳炉中进行。其热处理工艺见图 7-27。

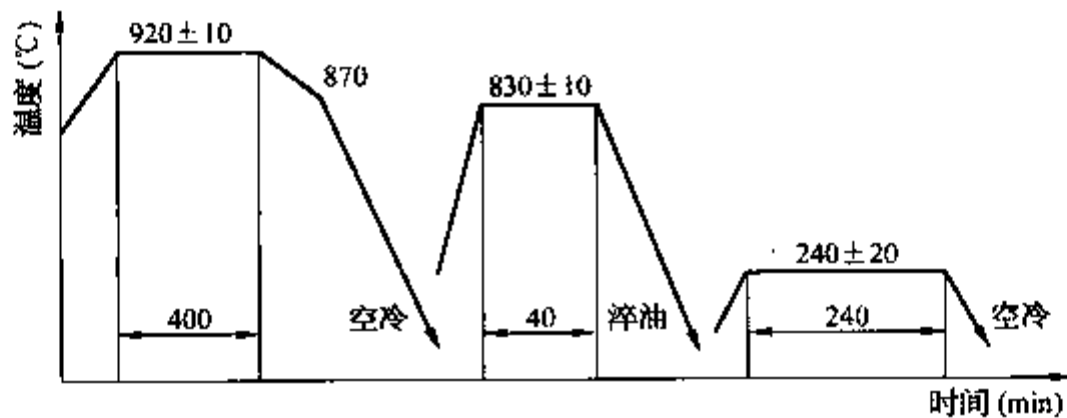


图 7-27 20Cr 钢凸轮轴的整体渗碳—淬火—低温回火

(2) 球墨铸铁 QT700-2 等温淬火 该凸轮轴长 1 154 mm, 轴承档直径 φ45 mm, 轴身直径 φ35 mm, 贯通的中孔直径 φ20 mm。球墨铸铁凸轮轴的等温淬火工艺见图 7-28, 在 100 kW 井式加热电炉中进行, 通氮基气氛保护。等温淬火在井式盐浴炉中进行。

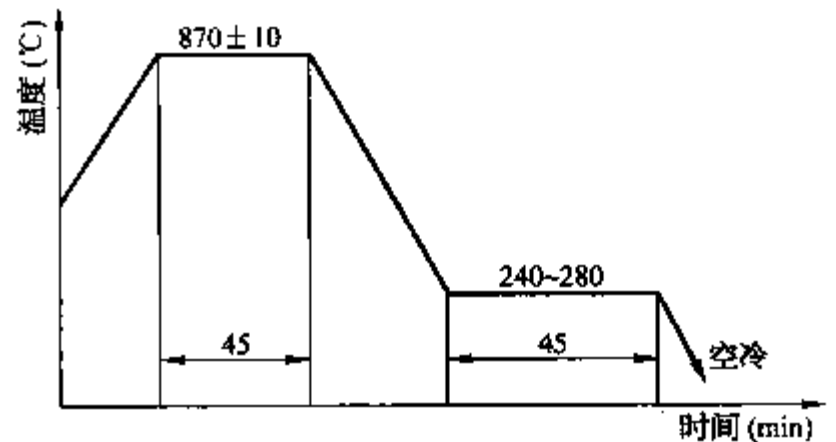


图 7-28 球墨铸铁(QT700-2) 凸轮轴的等温淬火

4. 发动机进、排气门的热处理

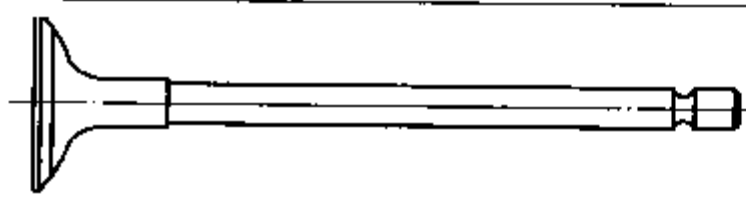
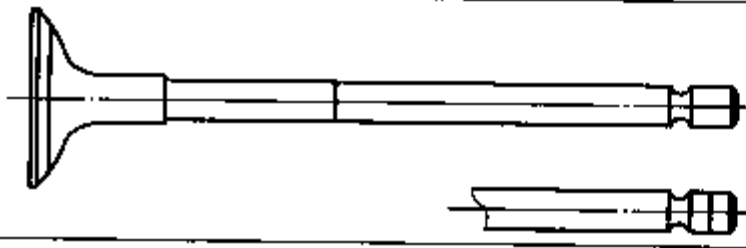
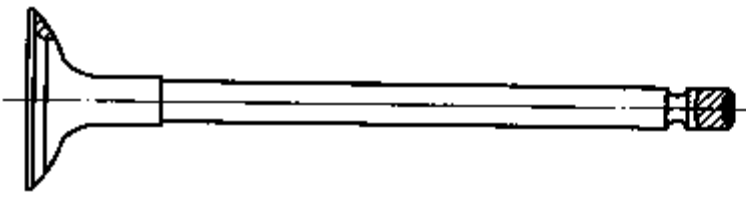
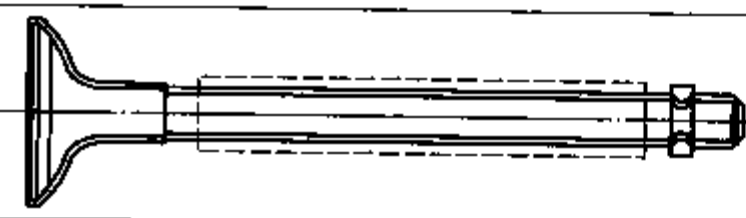
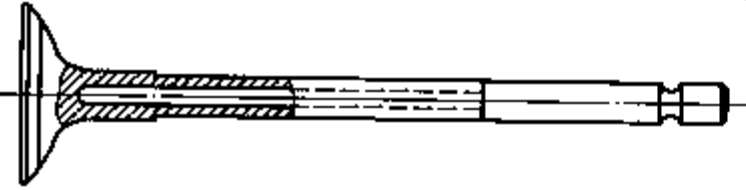
1) 发动机气门的基本型式 气门的型式有整体气门、焊接气门、堆焊合金气门、表面处理气门、中空钠冷气门等, 见表 7-16。

2) 气门常用材料、用途及其热处理(QC/T469) 见表 7-17。

3) 进、排气门热处理的注意事项

(1) 气门采用单一材料制造的, 如 40Cr10Si2Mo、90Cr18Mo2V、5Cr21Mn9Ni4N(21-4N) 等, 可采用整体热处理的方法, 热处理炉可选用盐浴炉或连续式炉。

表 7-16 气门的型式

名称	示意图
整体气门	
焊接气门	
堆焊合金气门	
表面处理气门 (渗氮、镀铬、 锁夹槽滚压)	
中空钠冷气门	

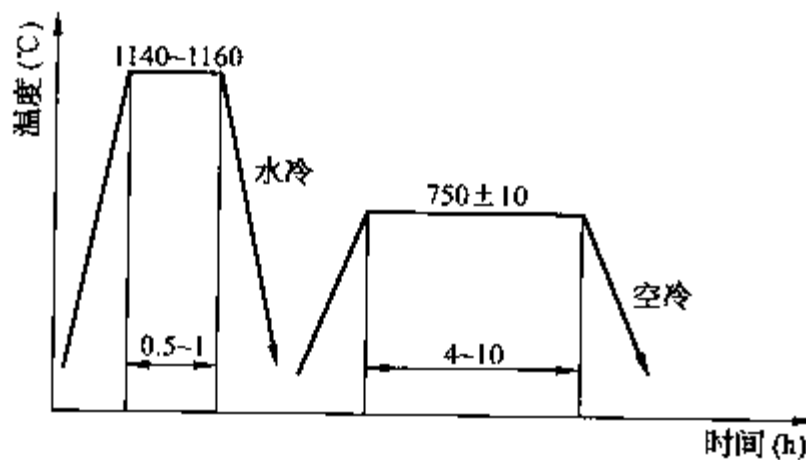


图 7-29 5Cr21Mn9Ni4N(21-4N)排气门典型的固溶—时效工艺

图 7-29 为 5Cr21Mn9Ni4N(21-4N)排气门典型的固溶—时效热处理工艺。

### 5. 发动机活塞销的热处理

1) 发动机活塞销的常用材料 常用材料有 20(GB/T699)、15Cr、20Cr、20CrMo、20Mn2、20CrMnMo、20CrNiMo、20CrMnTi(GB/T3077)等,均需经过渗碳或碳氮共渗—淬火—低温回火处理。发动机活塞销常用棒材及管材制造,一般制造工艺流程见表 7-18。大批量生产的活塞销均采用冷挤压或温挤压成形工艺,也有少量活塞销采用钻削工艺成形或用管材制造。

实际生产中,针对不同功率的发动机,其制造工艺流程又有多种变化,例如:

棒材下料—粗车—磷化—冷挤压成为杯状—钻除杯底—软化退火—磷化—冷挤压成型—一定长磨外圆—渗碳—淬火、回火—精加工—成品。

(2) 气门采用两种材料摩擦焊接而成的,一般杆身为结构钢或 40Cr10Si2Mo,气门头部为 5Cr21Mn9Ni4N(21-4N)等。

对于中等缸径,排量为 8 L 以上的增压机型,气门杆身和头部材料不同,应按各自的材料与性能要求进行热处理,然后摩擦焊接,且焊接强度必须大于气门头部强度的 90%。

对于小排量的发动机气门,气门杆身和头部可以先按各自的材料与性能要求进行热处理,然后摩擦焊接;也可以将气门杆身和头部先摩擦焊接、后整体热处理,以气门杆身的硬度作为热处理质量验收的依据。

表 7-17 发动机进、排气门常用材料、用途及其热处理

材料牌号	热处理温度(°C)						力学性能					热处理	用途
	淬火	回火	固溶	时效	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)	硬度 HB				
结构钢	40Cr	850±10 油冷	520±20 水冷			980	785	9	45	283~341	淬火回火	进气门 排气门杆	
	45Mn2	850±10 油冷	520±20 水冷			≥880	750	10	45	283~341	淬火回火	进气门 排气门杆	
马氏体钢	42Cr9Si2	1 000~1 050 油冷	700~780 空冷			880	590	19	50	266~325	淬火回火	进排气门	
	5Cr9Si3	1 000~1 050 油冷	720~820 空冷或水冷			900	700	14	40	266~325	淬火回火	进排气门	
	5Cr8Si2	1 000~1 050 油冷	720~820 空冷或水冷			900	685	14	40	266~325	淬火回火	进排气门	
	40Cr10Si2Mo	1 000~1 050 油冷	720~760 空冷或水冷			880	680	10	35	266~325	淬火回火	进排气门	
	80Cr20Si2Mo	1 030~1 080 油冷	700~800 缓慢冷却			880	680	10	15	296~325	淬火回火	进排气门	
奥氏体钢	90Cr18Mo2V	1 050~1 080 油冷	700~820 缓慢冷却			1 000	800	7	12	296~325	淬火回火	进排气门	
	45Cr14Ni14W2Mo			1 100~1 200 水冷	720~800 /6 h 水冷	690	315	25	35	≤248	固溶时效	排气门	
	5Cr20Mn8Ni2N (21-2N)			1 140~180 水冷	720~800 /4~8 h 空冷	900	550	8	10	≥30 HRC	固溶时效	排气门	
	53Cr21Mn9Ni4N (21-4N)			1 140~1 180 水冷	760~815 /6 h 水冷	950	580	8	10	≥28 HRC	固溶时效	排气门	

(续表)

材料牌号	热处理温度(°C)				力学性能				硬度 HB	热处理	用途
	淬火	回火	固溶	时效	$R_m \geq$ (MPa)	$R_{p0.2} \geq$ (MPa)	$A_5 \geq$ (%)	$Z \geq$ (%)			
2Cr21Ni12N (21-12N)			1 100~1 200 水冷	700~800 /6 h 空冷	780	390	26	20	$\leq 248$	固溶时效	排气门
5Cr21Mn9Ni4Nb2WN (21-4NWNb)			1 160~1 200 水冷	760~850 /6 h 空冷	950	580	12	15	$\geq 28$ HRC	固溶时效	排气门
6Cr21Mn10MoVNbN			1 160~1 200 水冷	760~850 /6 h 空冷	1 000	800	8	10	$\geq 30$ HRC	固溶时效	排气门
3Cr23Ni8Mn3N (23-8N)			1 150~1 170 水冷	800~830 /8 h 空冷	850	550	20	30	$\geq 22$ HRC	固溶时效	排气门
GHI45 (Incone1751)			1 100~1 150 水冷	840/24 h +700/2 h 空冷	1 100	750	12	20	$\geq 32$ HRC	固溶时效	排气门
Stellite 6									$\geq 40$ HRC		盘锥面堆焊
Stellite F									$\geq 40$ HRC		盘锥面堆焊
P37S(Stellite FS)									$\geq 40$ HRC		盘锥面堆焊
P25									$\geq 32$ HRC		盘锥面堆焊
Eatocite 6											盘锥面堆焊
Ni102(粉)									$\geq 50$ HRC		盘锥面堆焊
	奥氏体钢										
	高温合金										
	堆焊合金										

表 7-18 常用棒材及管材制造的发动机活塞销一般制造工艺流程

材料种类	一般制造工艺流程
棒材	退火—磷化—冷挤压—渗碳—淬火、回火—精加工—成品
	粗车外圆—渗碳—钻内孔—淬火、回火—精加工—成品
	感应加热—温挤压—渗碳—淬火、回火—精加工—成品
管材	热轧管材—粗车外圆—渗碳—淬火、回火—精加工—成品
	冷拔管材—下料—渗碳—淬火、回火—精加工—成品

2) 活塞销材料的软化退火 活塞销材料退火的目的主要是降低硬度、提高塑性,为挤压工艺做好准备。活塞销材料常用的软化退火工艺与要求见表 7-19。

表 7-19 活塞销材料的软化退火工艺与要求

材料牌号	退火工艺	硬度 HB
15Cr	(750±10)℃均温—保温后,随炉冷至 550℃后出炉空冷	≤137
20	(880±10)℃均温—保温后空冷	≤140
20Cr 20CrMo 20Mn2 20CrMnMo 20CrNiMo 20CrMnTi	1) (860±10)℃均温—保温后(炉内应滴入甲醇或通入放热式控制气氛保护),随炉冷至 600℃后出炉坑冷。两个阶段均需防止脱碳或渗碳 2) 活塞销装箱在燃油炉中(850±10)℃均温—保温后,随炉冷至 300℃以下空冷	

3) 活塞销的渗碳或碳氮共渗与组织性能要求

(1) 活塞销的渗碳或碳氮共渗。活塞销采取气体渗碳或气体碳氮共渗,在井式气体渗碳炉和连续式气体渗碳炉中进行。一般气体渗碳温度为 920~930℃,碳氮共渗温度为 870~880℃,保温时间依深度要求经工艺试验后决定。

为有效防止或消除表面层出现网状碳化物,经井式气体渗碳炉渗碳的活塞销,如出现连续网状碳化物,需采取二次淬火工艺,第一次 880℃淬油+高温回火,第二次淬火 820℃淬油+200℃回火。经连续式气体渗碳炉渗碳—淬火、回火生产线的活塞销,可以采取渗碳—进入预冷室快冷至 Ar<sub>1</sub> 稍低温度—进入淬火加热炉加热—淬火—清洗—200℃回火的工艺,其中渗碳—快冷至 Ar<sub>1</sub>,因发生相变可以起到细化晶粒的作用。

某发动机活塞筒图见图 7-30。以渗碳层深度为要求的活塞销渗碳层深度见表 7-20,以硬化层深度为要求的活塞销硬化层深度见表 7-21,以渗碳活塞销的硬度为要求的活塞销硬度见表 7-22。

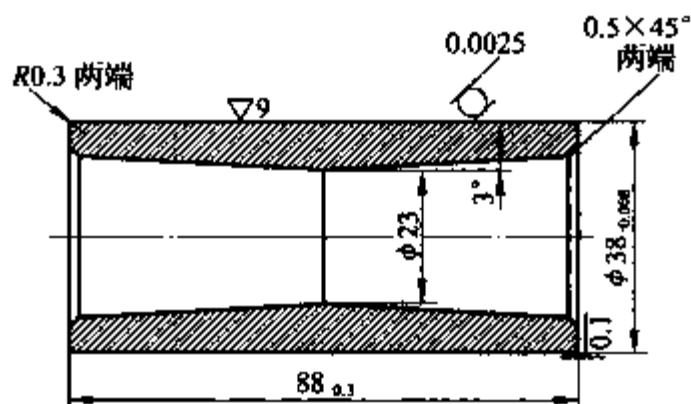


图 7-30 某发动机活塞筒图

表 7-20 以渗碳层深度为要求的活塞销渗碳层深度

活塞销壁厚 (mm)	外圆表面渗碳层深度 (mm)	内孔表面渗碳层深度 (mm)	内外圆表面渗碳层深度之和占壁厚的比例(%)
1.5~3	≥0.25	≥0.05	≤40
>3~4	≥0.30		≤35
>4~6	≥0.40	≥0.40	≤33
>6~8	0.50~1.20		
>8~10	0.60~1.20		
>10	0.80~1.70		—

注:内孔表面不渗碳时,外圆表面渗碳层深度由具体产品图样规定。



表 7-21 以硬化层深度为要求的活塞销硬化层深度

活塞销壁厚 (mm)	外圆表面硬化层深度 (mm)	内孔表面硬化层深度 (mm)	内外圆表面硬化层深度 之和占壁厚的比例(%)
1.5~3	$\geq 0.25$	$\geq 0.10$	$\leq 40$
>3~5	$\geq 0.30$		$\leq 35$
>5~10	0.60~1.50	0.60~1.70	
>10~20	0.80~1.70	0.80~1.90	
>20	1.0~2.0		—

注：硬化层深度系指活塞销外圆表面到内部规定硬度值处的垂直距离。对优质碳素结构钢，界限硬度值为 550 HV1，对焊接结构钢，硬度界限值为 500 HV1。

表 7-22 以渗碳活塞销的硬度为要求的活塞销硬度

活塞销壁厚 (mm)	活塞销外圆表面的 硬度 <sup>①</sup> HRC	活塞销心部的硬度 HRC <sup>②</sup>		
		20 钢	15Cr, 20Cr	20Mn2
1.5~10	58~64	$\leq 38$	24~46	24~48
>10~18		—	20~40	

注：① 活塞销外圆表面的硬度对有体积稳定性要求时为 56~64 HRC，同一活塞销硬度差 $\leq 3$  HRC。

② 常用其他合金结构钢制造的活塞销，其心部硬度由具体产品图样规定。

## (2) 渗碳活塞销的显微组织要求(表 7-23)

表 7-23 渗碳活塞销的显微组织要求

马氏体分级	对马氏体的要求	碳化物分级	对碳化物的要求
1 级：隐针状马氏体 2 级：细针状马氏体 3 级：较细针状马氏体 4 级：针状马氏体 5 级：中等针状马氏体 针叶长度 $>12\sim 16\ \mu\text{m}$ 6 级：较粗针状马氏体 针叶长度 $>16\sim 24\ \mu\text{m}$ 7 级：粗针状马氏体 8 级：粗大针状马氏体	1~5 级合格	1 级：粒状碳化物均匀分布 2 级：粒状碳化物均匀分布，但有少量碳化物呈线段状 3 级：粒状碳化物呈断续网状 4 级：粒状碳化物呈不完全网状 5 级：断续碳化物呈封闭网状	1~3 级合格

## 第三节 大件热处理

### 一、大型锻件热处理

大型锻件通常指毛坯质量在 3 t 以上，由 5 t 锻锤或 1 000 t 以上压力机生产的锻件，如汽轮机叶轮、转子、发电机转子、船轴、大轧辊、大型火炮身管等。

#### (一) 大型锻件的冶金特点

大型锻件通常由钢锭直接锻成，钢锭的重量一般是锻件重量的 1.25~1.35 倍。大型锻件常存在以下质量问题：化学成分不均匀，含有一定量的气体和夹杂物，晶粒粗大及组织不均匀，有较大的锻造应力和组织应力，因表面和心部成分偏析及冷却速度不同造成的组织和力学性能的差异等。

锻件经切削加工后进行的热处理称为最终热处理。有的锻件经过锻后热处理，相关的性能指标已能达到

规定的指标值,此时的锻后热处理也可认为最终热处理。

(二) 大型锻件的锻后热处理

通常把锻造成形后随即进行的热处理称为锻后热处理,可将改善锻件内部组织、细化晶粒的正火和预防白点的退火结合在一起。对于一些仅锻成坯料或加工后仍需正火的锻件来说,锻后可省去正火工序,直接进行预防白点退火。

1. 大锻件中的白点与氢脆

白点是锻件中的一种内部裂纹,在锻件的纵向断面上呈现为边缘清晰的圆形或椭圆形银白色的斑点,在横向低倍试片上为网状裂纹。氢在钢中的存在,同时会降低钢的塑性和韧性,这种现象称为氢脆。一般认为钢中的氢和应力的存在是促使形成白点的主要原因。不同钢种的锻件产生白点的敏感性不同,通常按照白点敏感性的大小将常用的钢号划分为 I ~ VI 组。

2. 大锻件的锻后热处理工艺

I、II、III 组钢锻后等温缓冷工艺曲线及参数分别见图 7-31、表 7-24, IV、V、VI 组钢大锻件的锻后起伏等温缓冷工艺曲线及参数分别见图 7-32、表 7-25、表 7-26、图 7-33 和表 7-27、图 7-34 为锻后热装炉正火回火工艺曲线。不同钢号锻件的正火或退火及高温回火温度可参见表 7-28。表 7-29~表 7-31、图 7-35~图 7-37 列出了工具钢大锻件的锻后热处理工艺。

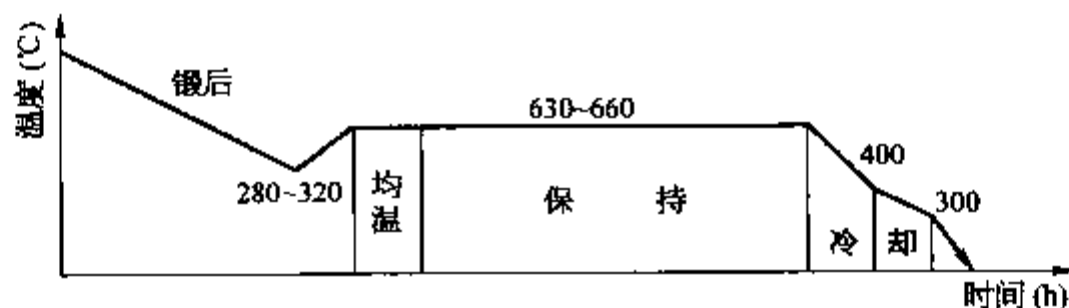


图 7-31 I、II、III 组钢典型的锻后等温缓冷(预防白点退火)工艺曲线

表 7-24 I、II、III 组钢锻后等温缓冷(预防白点退火)工艺参数表

组别	钢号	直径 (mm)	保持(h)[按钢锭氢含量(10 <sup>-4</sup> %)确定]					冷却速度 (°C/h) ≤		出炉温度 (°C) ≤
			≤2.5	3.5	4.5	6	7			
I	15~55	≤300	6~9	6~9	12~18	25~40	35~50	60	—	300
		301~500	9~15	9~15	18	40~60	50~85	50	—	300
		501~800	15~24	15~24	18~65	60~175	85~250	50	30	300
II	16Mn~30Mn, 20Mn2, 20Cr~40Cr, 15CrMo~35CrMo, 20SiMn~35SiMn, 20MnMo, 18MnMoNb, 20CrMnTi	≤300	6~9	10~15	25~35	35~55	45~65	60	—	300
		301~500	9~15	15	35~50	55~100	65~125	50	30	300
		501~800	15~24	15~52	50~150	100~265	125~340	40	20	300
III	50Mn, 55Cr, 12Cr2Mo1, 20Cr1Mo1, 1Cr5Mo, 34CrMo1, 42CrMo, 50CrMo, 12Cr1MoV, 17MoV, 24CrMoV, 35CrMoV, 35CrMnMo, 40CrMnMo, 38CrMoAl, 42SiMn, 50SiMn, 12Cr13, 20Cr13, 30Cr13	≤300	8~12	15~22	25~40	40~60	45~70	50	—	300
		301~500	12~20	22	40~60	50~110	70~140	40	20	300
		501~800	20~32	22~80	60~180	110~295	140~360	30	15	300

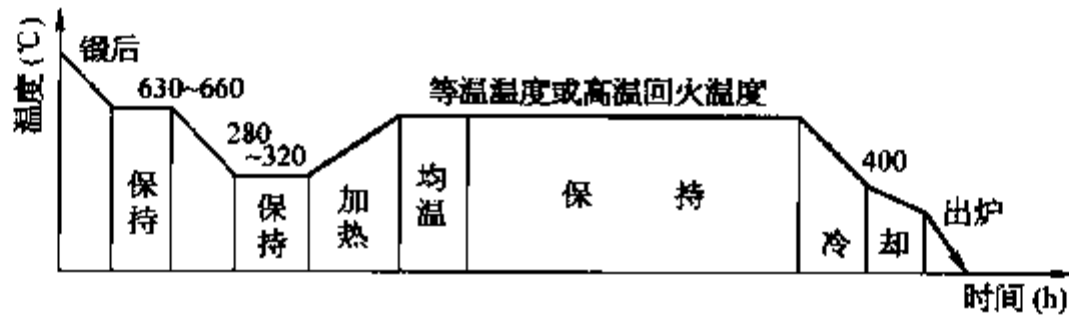


图 7-32 IV、V、VI组钢典型的锻后起伏等温缓冷(预防白点退火)工艺曲线

表 7-25 IV、V、VI组钢典型的锻后起伏等温缓冷(预防白点退火)工艺参数

组别	钢号	直径 (mm)	保温 (h)	冷却	保温 (h)	加热 (°C/h) ≤	均温 (h)	保持(h)[按钢锭氢含量(10 <sup>-6</sup> )确定]					冷却速度 (°C/h) ≤		出炉温度 (°C) ≤
								≤2.5	3.5	4.5	6	7			
IV	12CrNi2、 40CrNi、 50CrNi、 30Cr2MoV、 30Cr1Mo1V、 34CrNi1Mo、 40CrNiMo	≤300	2	停火炉冷	3~5	100	—	6~9	8~12	20~30	35~50	40~60	50	25	300
		301~500	3		5~8	80	—	9~15	12~15	30~40	50~90	60~125	40	20	250
		501~700	4		8~11	60	—	15~21	15~30	40~115	90~195	125~255	30	15	200
V	S15Cr2Ni2、 S17Cr2Ni2Mo、 25Cr2NiMoV、 18CrMnMoB、 20Cr2Mn2Mo、 30CrMn2MoB、 32Cr2Mn2Mo、 32Cr3WMoV、 37SiMnMo、 5CrMnMo、 40CrNi2Mo、 5CrNiMo、 5CrNiW、 5SiMnMoV、 5CrSiMnMoV、 60CrMnMo、 60CrMnMo1、 50CrNiMo	≤300	2	停火炉冷	3~5	80	—	6~9	11~17	25~35	35~55	45~65	40	20	250
		301~500	3		5~8	60	—	9~15	17	35~55	55~105	65~130	30	15	200
VI	18Cr2Ni4W、 20Cr2Ni4、 25Cr2Ni4MoV、 S30Cr2Ni2Mo、 34CrNi3Mo、 34CrNi3MoV	≤300	3	停火炉冷	3~6	80	—	10~15	25~40	30~50	50~75	60~90	40	20	200
		301~500	4		6~9	60	—	15	40~60	50~110	75~155	9~180	30	15	150

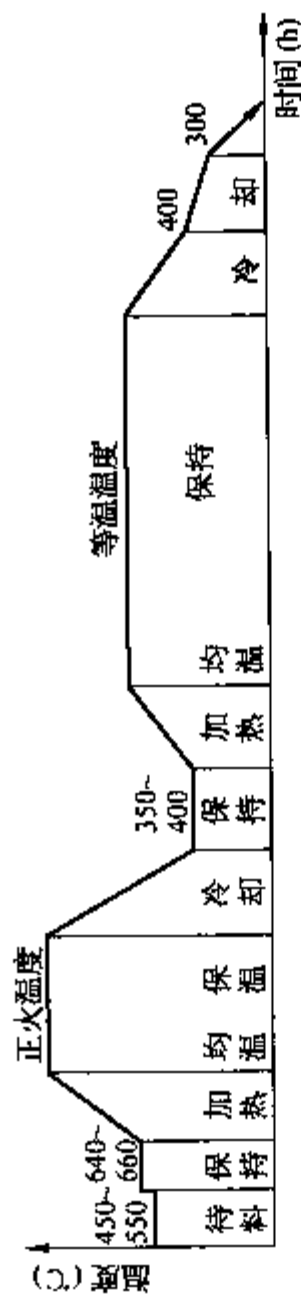


图 7-33 I、II、III组钢锻后热处理—热装炉正火等温缓冷(预防白点退火)工艺曲线

表 7-26 I、II、III组钢锻后热处理—热装炉正火等温缓冷(预防白点退火)工艺参数

组别	钢号	直径 (mm)	保温 (h)	加热 (°C/h) ≤	保温 (h)	冷却	保温 (h)	加热 (°C/h) ≤	保持(h)[按钢锭氢含量(10 <sup>-4</sup> %)确定]							冷却速度 (°C/h) ≤	出炉温度 (°C) ≤
									≤2.5	3.5	4.5	6	7				
I	15~55	≤300	2	功率	1~2.5	空冷至 350~400°C	2	功率	4~6	4~6	4~6	10~15	17~26	炉冷	300		
		301~500	2	功率	2.5~4		2~3	100	6~10	6~10	15	25~35	60	300			
		501~700	3	功率	4~5.5		3~4	80	10~14	10~14	15~65	35~110	50	350			
		701~1000	4	100	5.5~8		4~5	70	14~20	14~20	65~225	110~310	50	300			
		1001~1300	5	80	8~10.5		5~7	60	20~26	20~26	225~470	310~615	40	20	300		
II	16Mn~30Mn, 20Cr~40Cr, 15CrMo~35CrMo, 20SiMn~35SiMn, 20MnMo, 18MnMoNb, 20CrMnTi	≤300	3	功率	1~2.5	空冷至 350~400°C	2~3	100	4~6	6~10	6~10	20~30	25~40	60	300		
		301~500	3~5	功率	2.5~4		3~6	90	6~10	6~10	30~50	40~75	50	30	300		
		501~700	5~7	功率	4~5.5		6~9	80	10~14	10~14	50~130	75~180	50	30	300		
		701~1000	7~10	100	5.5~8		9~12	70	14~20	14~20	130~360	180~450	40	20	300		
		1001~1300	10~13	80	8~10.5		12~15	60	20~26	20~26	360~690	450~845	30	15	200		
III	50Mn, 55Cr, 12Cr2Mo1, 20Cr1Mo1, 1Cr5Mo, 34CrMo1, 42CrMo, 50CrMo, 12Cr1MoV, 17MoV, 24CrMoV, 35CrMoV, 35CrMnMo, 38CrMoAl, 42SiMn, 50SiMn, 1Cr13, 2Cr13, 3Cr13	≤300	3	功率	1~3	空冷至 350~400°C	2~3	100	4~6	10~16	10~16	25~35	30~48	60	40	300	
		301~500	3~5	功率	3~5		3~6	90	6~10	6~10	35~60	48~90	50	30	300		
		501~700	5~7	100	5~7		6~9	80	10~14	10~14	60~155	90~210	50	30	250		
		701~1000	7~10	80	7~10		9~12	70	14~20	14~20	155~405	210~500	40	20	200		
		1001~1300	10~13	70	10~13		12~16	60	20~26	20~26	405~770	500~920	30	15	150		
1301~1500	13~15	70	13~15	15~18	50	225~360	225~360	770~1080	920~1260	30	15	120					

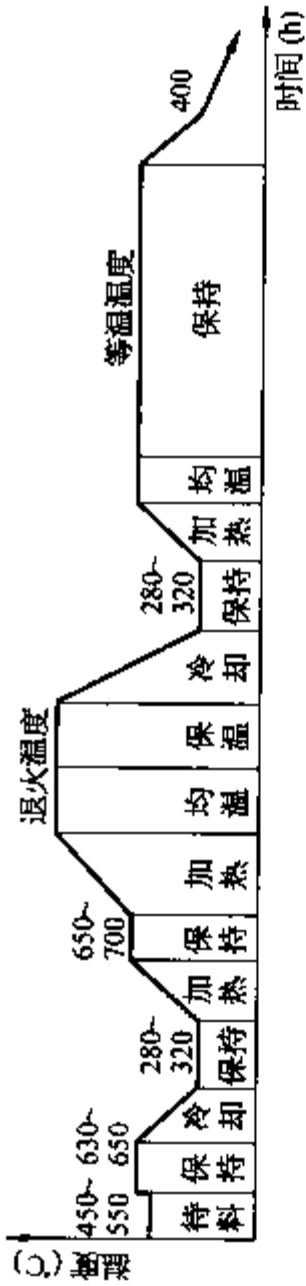


图 7-34 IV、V、VI 组钢退火后热处理—热装炉退火等温缓冷(预防白点退火)工艺曲线

表 7-27 IV、V、VI 组钢退火后热处理—热装炉退火等温缓冷(预防白点退火)工艺参数

组别	钢号	直径 (mm)	保持 (h)	冷却	加热 (°C/h) ≤	保持 (h)	加热 (°C/h) ≤	保温 (h)	冷却	保持 (h)	加热 (°C/h) ≤	保持 (h) [按氮含量 (10 <sup>-4</sup> %) 确定]							冷却速度 (°C/h) ≤	出炉温度 (°C) ≤
												≤2.5	3.5	4.5	6	7				
IV	12CrNi2, 40CrNi, 50CrNi, 30Cr2MoV, 30CrMo1V, 34CrNi1Mo, 40CrNiMo2	≤300	2		功率	2	功率	1~3		4~6	80	4~6	12~18	24~36	32~48	40	200			
		301~500	2~3		80	3	100	3~5		6~10	70	6~10	18~65	36~100	30	180				
		501~700	3~5		70	4	80	5~7		10~14	60	10~14	18~70	65~215	30	150				
		701~1050	5~7		60	6	70	7~10		14~21	50	14~21	70~280	160~580	20	120				
V	S15Cr2Ni2, S17Cr2Ni2Mo, 25Cr2NiMoV, 18CrMnMoB, 20Cr2Mn2Mo, 30CrMn2MoB, 32Cr2Mn2Mo, 32Cr3WMoV, 37SiMnMo, 5CrMnMo, 40CrNi2Mo, 5CrNiMo, 5CrNiW, 5SiMnMoV, 5CrSiMnMoV, 60CrMnMo, 60CrMnMo1, 50CrNiMo	≤300	2		功率	3	功率	1~3		4~6	80	4~6	16~25	30~45	36~55	40	200			
		301~500	2~3		80	4	100	3~5		6~10	70	6~10	25~30	45~80	55~105	30	180			
		501~700	3~5		70	5	80	5~7		10~14	60	10~14	30~100	80~245	30	150				
		701~1050	5~7		60	7	70	7~10		14~21	50	14~21	100~330	190~635	20	120				
VI	18Cr2Ni4W, 20Cr2Ni4, 25Cr2Ni4MoV, S30Cr2Ni2Mo, 34CrNi3Mo, 34CrNi3MoV	≤300	2		功率	3	功率	1~3		4~6	80	4~6	25~35	40~65	50~75	40	200			
		301~500	2~3		80	4	100	3~5		6~12	70	6~10	35~85	65~130	75~160	30	150			
		501~700	3~5		70	5	80	5~7		12~16	60	10~14	85~200	130~330	30	10				
		701~1050	5~7		60	7	70	7~10		16~25	50	14~21	200~540	290~840	20	100				



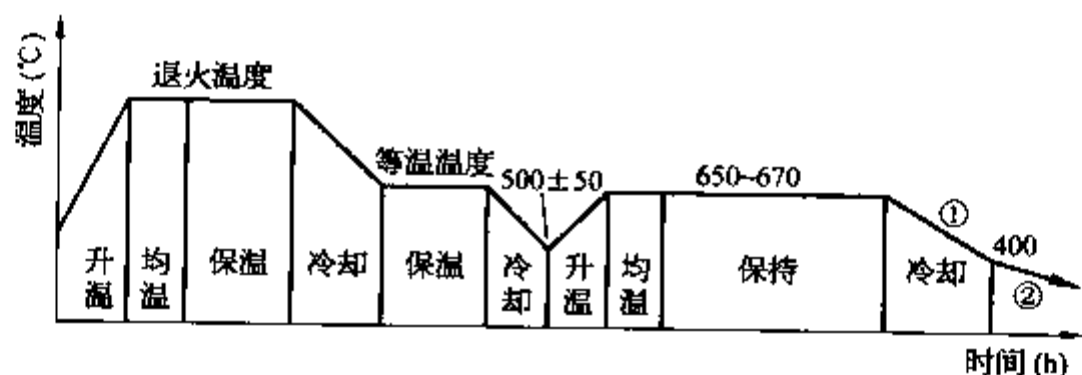


图 7-35 工具钢热装炉球化退火及预防白点退火工艺曲线

表 7-29 工具钢热装炉球化退火及预防白点退火工艺参数

钢号	装炉温度 (°C)	升温	保温 (h)	冷却 (°C/h)	保温 (h)	冷却	升温	保温系数 (h/100 mm)	冷却速度① (°C/h)	冷却速度② (°C/h)	出炉温度 (°C)
T7, T8 T10, T12	600~800	按功率	750~770°C 1.5~3.5	炉冷	660~680°C 2~4	炉冷	按功率	5~6	<30	<15	200
5CrW2Si 6CrW2Si	500~600	按功率	790~810°C 1.5~3.5	炉冷	700~720°C 3~5	炉冷	按功率	8~10	<30	<15	200
GCr15 GCr15SiMn	500~600	按功率	770~790°C 1.5~3.5	炉冷	680~700°C 3~5	炉冷	按功率	10~15	<30	<15	200
3Cr2W8V	500~600	按功率	900~910°C 1.5~3.5	炉冷	730~750°C 3~5	炉冷	按功率	10~15	<30	<15	200

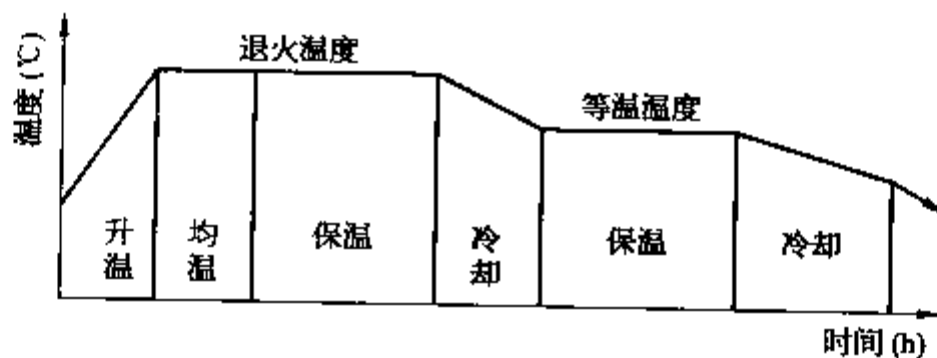


图 7-36 工具钢冷装炉球化退火工艺曲线

表 7-30 工具钢冷装炉球化退火工艺参数

例号	装炉 (°C)	升温	保温 (h)	冷却	保温 (h)	冷却速度 (°C/h)	出炉温度 (°C)
T7, T8, T10, T12	500~600	按功率	750~770°C 1.5~3.5	炉冷	660~680°C 2~4	<60	500~550
W9CrAV, W18Cr4V Cr12MoV, Cr6WV	500~600		830~850°C 1.5~3.5		720~750°C 4~6	<40~50	500~550
9CrSi, 4CrW2Si 6CrW2Si	500~600		790~810°C 1.5~3.5		700~720°C 3~5	<40~50	500~550
GCr15, CrMn GCr15SiMn, CrWMn	500~600		770~790°C 1.5~3.5		600~700°C 3~5	<40~50	500~550

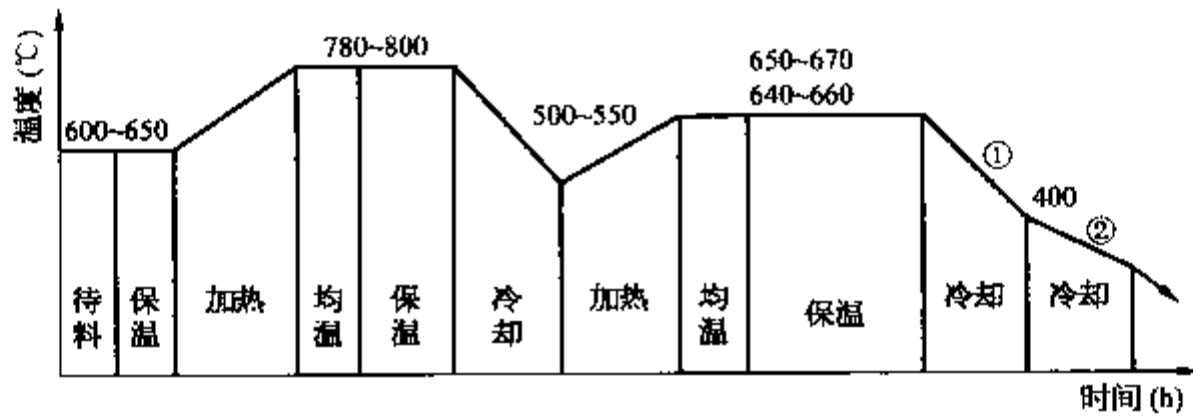


图 7-37 工具钢热装炉预防白点退火工艺曲线

表 7-31 工具钢热装炉预防白点退火工艺参数

钢号	截面 (mm)	待料	保温	加热 (°C/h)	均温	保温	冷却	加热 (°C/h)	保温	冷却速度① (°C/h)	冷却速度② (°C/h)	出炉温度 (°C)
90Cr、9CrSi	>200	500~520°C		按功率	780~810°C		空冷 450~500	按功率	10 h/ 100 mm	<40	<20	150
		—	2 h		—	1 h/ 100 mm						
9Cr2W	500~700	—	8 h	<100	—	6~8°C	炉冷	<80	50~70	<30	<15	200
9Cr2Mo	700~800	—	10 h	<80	—	8~10°C	炉冷	<70	70~80	<30	<15	180

### (三) 大型锻件的最终热处理

大型锻件经粗加工后进行的热处理称为最终热处理。一般采用正火、淬火及其后的高温回火等工艺,以达到锻件所要求的性能或为后续的表面热处理作组织准备。

#### 1. 大锻件正火、淬火的加热温度

大锻件的正火和淬火温度一般都取规定温度的上限,可以提高淬透性,避免负偏析区的加热不足。常用钢大锻件的淬火加热温度见表 7-32。

表 7-32 常用大锻件用钢的淬火加热温度

钢号	温度(°C)	钢号	温度(°C)	钢号	温度(°C)
25	850~880	50SiMn	820~840	42MnMoV	860~880
35	850~870	55Si2Mn	860~880	24CrMnN	870~890
45	830~850	60Si2MnA	850~870	30CrMnSi	850~870
55	800~830	70SiMnA	850~870	35CrMnSi	850~870
50Mn	800~820	35SiMnMo	870~890	18CrMnTi	800~870
60Mn	800~820	42SiMnMo	850~870	15CrMo	890~910
65Mn	800~820	60SiMnMo	830~850	20CrMo	880~900
35Mn2	800~850	37SiMn2MoV	850~870	30CrMo	860~880
45Mn2	810~840	42SiMnMoV	860~880	34CrMo1A	850~870
50Mn2	810~840	55Si2MnV	850~870	35CrMo	850~870
20SiMn	880~900	20MnMo	890~910	42CrMo	840~860
35SiMn	860~880	18MnMoNb	910~930	18CrMnMoB	870~890
42SiMn	840~860	32MnMoVB	850~870	20Cr2Mn2MoA	870~890



(续表)

钢号	温度(°C)	钢号	温度(°C)	钢号	温度(°C)
20Cr2Mn2MoA	800~820	45CrNi	830~850	5CrMnMo	830~860
34Cr3WMoV	850~860	34CrNiMo	850~870	5CrNiMo	830~860
30CrMn2MoB	870~890	34CrNi2Mo	850~870	5CrNiW	830~860
32Cr2MnMo	870~890	34CrNi3Mo	850~870	5CrSiMnMoV	850~870
35CrMnMo	850~870	18Cr2Ni4WA	890~900	5SiMn2W	860~890
38CrMnNi	850~870	20CrNi4A	870~890	3Cr2W8	1 040~1 060
40CrMnMo	850~870		800~820	3Cr2W8V	1 040~1 060
60CrMnMo	830~850	30Cr2Ni2Mo	860~880	4CrWMo	850~870
24CrMoV	870~890	35CrNiW	850~870	4SiMnMoV	900~920
30CrMoV9	850~870	45CrNiMoV	850~870	20Cr13	980~1 000
30Cr2MoV	840~850	9Cr2	840~870	30Cr13	1 000~1 050
35CrMoVA	890~910	9Cr2W	860~880	GCr15	820~860
60CrMoV	840~860	9SiCr	840~860	GCr15SiMn	820~840
20Cr	280~820	4CrW2Si	910~930	1Cr18Ni9Ti	1 050~1 150
40Cr	840~860	6CrW2Si	850~900	Cr5Mo	1 000~1 050
55Cr	820~840	Cr12MoV	1 020~1 040		
40CrNi	840~860		1 130~1 150		

2. 大锻件淬火、正火的加热制度

1) 装炉温度和加热速度 大型锻件须限制装炉温度和升温速度,以避免加热时产生较大的内外温差和热应力,特别对于碳和合金元素含量较高的大锻件,因材料导热性和塑性差,稍有不慎就将导致锻件内部开裂。图 7-38、表 7-33、图 7-39、表 7-34 是按照锻件尺寸和不同钢号组别列出的淬火、正火加热工艺曲线,其中:

- I 组为  $w_c$  小于 0.45% 的碳素结构钢及低合金结构钢。
- II 组为  $w_c$  大于 0.45% 的碳素结构钢及低合金结构钢。
- III 组为中、高合金结构钢。
- IV 组为工模具钢。

加热的关键阶段是在 650°C 以下升温时段,锻件心部尚处在低温的冷硬状态,升温速度要控制在 30~70°C/h。在 400~450°C 和 600~650°C 阶段停留的目的,是为了减小锻件心部和表面的温差。在 650°C 以上加热速度可相应加快,一般取 50~100°C/h。对于截面更大、合金元素含量很高的重要锻件应十分慎重地制订加热规范。

2) 均温和保温 大型锻件无论正火或淬火,加热到规定温度后,保温时间一般在空气炉加热时取 0.6~1.0 h/100 mm,碳素钢取下限,合金钢取上限。

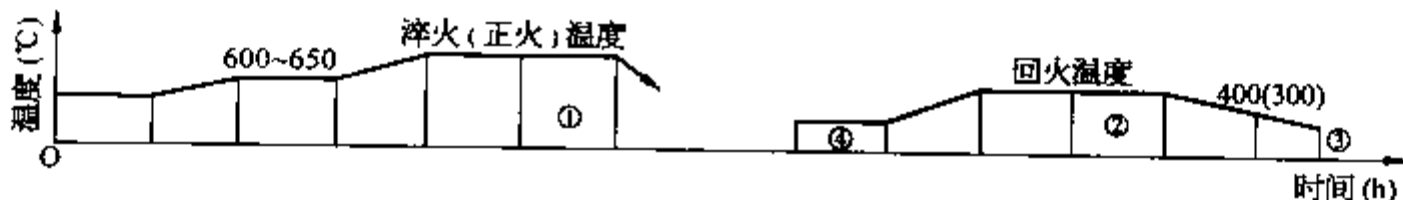


图 7-38 大锻件最终热处理工艺曲线

- 注: ① 对截面很小的零件,保温时间可增长至 1.3~1.5 倍。
- ② 小截面零件或在较低温度回火时,保温时间可增长至 1.3~1.5 倍。
- ③ 出炉温度上限适用于畸变倾向小的一般零件,畸变倾向大或重要锻件出炉温度采用下限。
- ④ 18Cr2Ni4W 低温回火保温时间为规定的 1.5 倍

表 7-33 大锻件最转热处理工艺参数

组别	截面 (mm)	装炉温度 (°C)	保温 (h)	升温 (°C/h) ≤	保温 (h)	升温 (°C/h) ≤	均温 (h)	保温	冷却方法	装炉温度 (°C)	保温 (h)	升温 (°C/h) ≤	均温 (h)	保温	冷却速度 (°C/h) ≤	冷却方法	出炉温度 (°C) ≤
I	≤100	加热温度	—	—	—	—	目测	—	—	350~400	—	—	目测	—	空冷	—	—
	101~250																
	251~400																
	401~600																
	601~800																
	801~1 000																
II	≤100	加热温度	—	—	—	—	目测	0.6~0.8 h/ 100 mm	空冷 或 按表 7-35 冷却	350~400	—	—	目测	1.5~2.0 h/ 100 mm, 但不小于 4 h	空冷	—	—
	101~250																
	251~400																
	401~600																
	601~800																
	801~1 000																
III	≤100	加热温度	—	—	—	—	目测	0.8~1.0 h/ 100 mm	空冷 或 按表 7-35 冷却	250~350	—	—	目测	1.5~2.5 h/ 100 mm, 但不小于 4 h	空冷	—	—
	101~250																
	251~400																
	401~600																
	601~800																
	801~1 000																
IV	≤100	400~450	1	70	1~2	100	目测	—	—	250~350	1~2	80	目测	—	炉冷	≤400	—
	101~250																
	251~400																
	401~600																
	601~800																
	801~1 000																

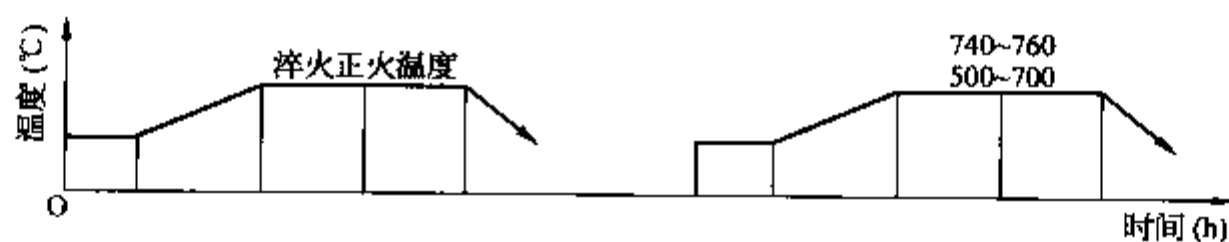


图 7-39 12Cr13、20Cr13、30Cr13、Cr5Mo 锻件热处理工艺曲线

注：740~760℃为 Cr5Mo 钢的回火温度

表 7-34 12Cr13、20Cr13、30Cr13、Cr5Mo 锻件热处理工艺参数

截面 (mm)	装炉温度 (°C)	保温 (h)	升温 (°C/h) ≤	均温	保温 (h)	冷却	装炉温度 (°C)	保温 (h)	升温 (°C/h) ≤	均温	保温 (h)	冷却
≤50	550~650	0.5	—	目 测	0.75	按表 7-36 或 空冷	350~400	1	100	目 测	1~2	空冷
51~100	400~500	1.0	1.0		300~350		1	100	3~4		油冷	
101~150	350~450	1.5	1.5		300~350		1.5	100	4~6		油冷	
151~300 <sup>①</sup>	350~450	2~3	80		2~3	空冷	300~350	2~3	60	6~10	炉冷至 250℃ 出炉	

注：①适用于 Cr5Mo 钢锻件。

### 3. 大锻件正火、淬火的冷却

1) 冷却介质和冷却方法 大型锻件无论正火或淬火，常用的冷却介质有空气、水、油三大类。冷却方法有静止空气冷却、鼓风冷却、喷雾冷却、油冷却、水冷却、喷水冷却、水淬油冷、空冷—油冷（延迟淬火）、水冷—空冷—水冷及水冷—空冷—水冷—油冷等。

以水冷为例，可参考钢的碳当量选择，锻件的碳当量用下式计算：

$$CE = [\omega_C + \omega_{Mn}/20 + \omega_{Ni}/15 + (\omega_{Cr} + \omega_{Mo} + \omega_N)/10] \%$$

当锻件中正偏析区的碳当量  $CE \leq 0.75\%$ ，正偏析区的碳含量  $\leq 0.31\%$  时，锻件可以无危险的采用水淬；

当锻件中正偏析区的碳当量  $CE$  为  $0.75\% \sim 0.88\%$ ，正偏析区的碳含量为  $0.32\% \sim 0.36\%$  时，锻件可以采用水淬，但应特别小心；

当锻件中正偏析区的碳当量  $CE \geq 0.88\%$ ，正偏析区的碳含量  $\geq 0.36\%$  时，若无特别指导，锻件禁止采用水淬。

2) 淬火冷却时间和终冷温度 实际生产中淬火冷却时间要兼顾锻件心部温度和表面温度。冷却介质、锻件尺寸、冷却时间和锻件心部温度四者之间关系可参见图 7-40、图 7-41。由图可查到冷至  $(T_{\text{淬}} + T_{\text{介}})/2$  及  $T_{\text{淬}}/3 + 2T_{\text{介}}/3$  温度，不同直径锻件在空气、水、油介质中冷却所需时间。其中， $T_{\text{淬}}$  为锻件淬火温度， $T_{\text{介}}$  为冷却介质温度。

有淬裂倾向的锻件冷却时，表面温度不应低于  $100 \sim 150^\circ\text{C}$ ，而淬油锻件的表面温度不应超过  $200^\circ\text{C}$ ，避免油槽起火。表面温度可以用表面热电偶或红外测温仪在现场测定。

### 4. 大型锻件的回火

大锻件淬火后应及时回火，间隔时间一般不超过  $2 \sim 3$  h。

1) 不同截面尺寸的常用碳钢、合金结构钢及不锈钢热处理工艺参数及力学性能 见表 7-35、表 7-36、表 7-37。

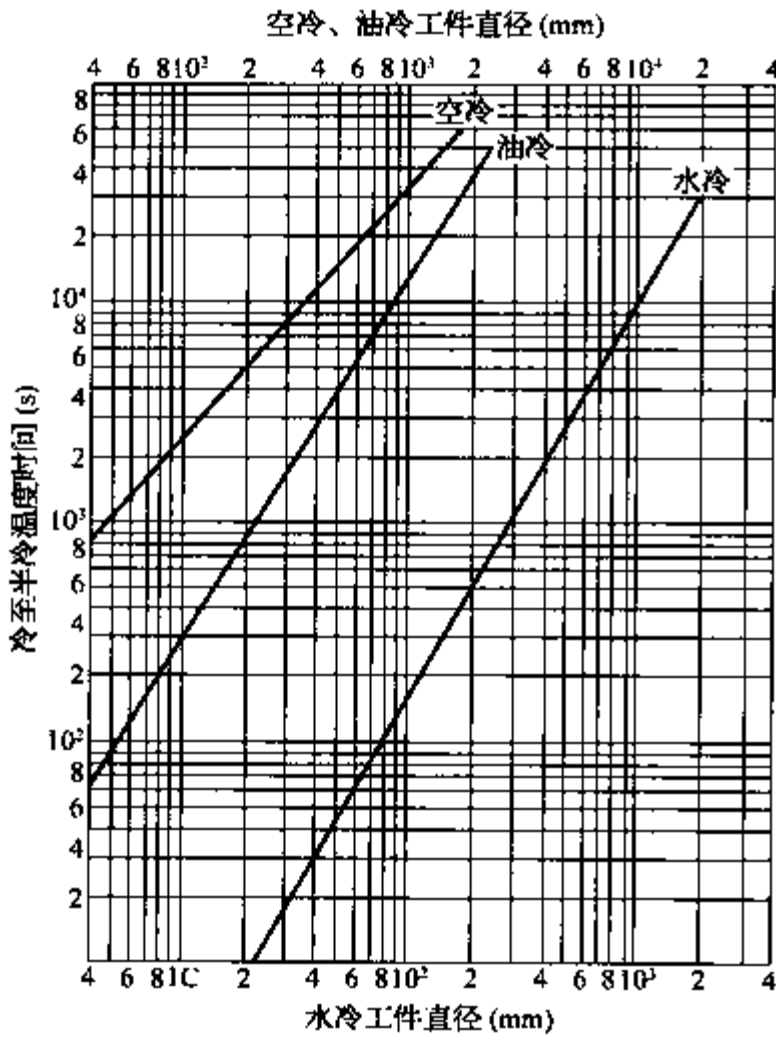


图 7-40 不同直径锻料心部冷却至  $\frac{1}{2}(T_{\text{中}}+T_{\text{介}})$  的时间

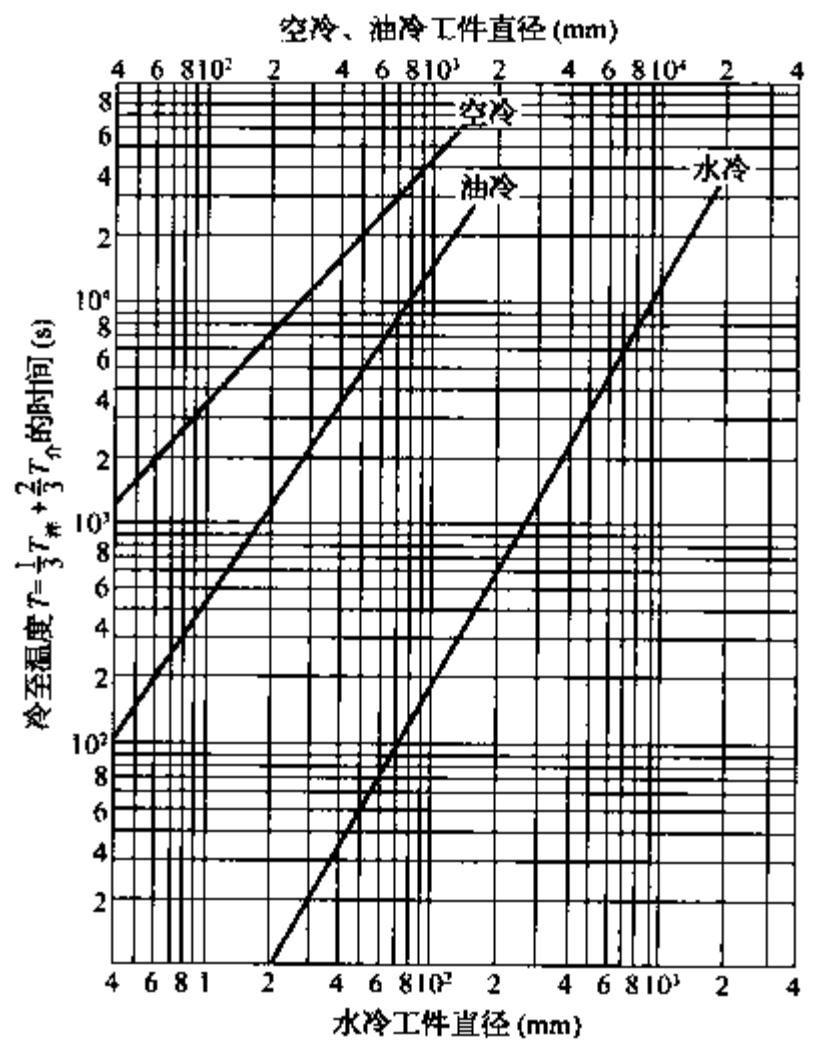


图 7-41 不同直径锻料心部冷却至  $\frac{1}{3}T_{\text{中}} + \frac{2}{3}T_{\text{介}}$  的时间

表 7-35 优质碳素钢锻件热处理后的力学性能

钢号	截面尺寸 (mm)	试样方向	试验状态	力学性能					硬度 HB	热处理		
				$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}$ (MPa)	A (%)	Z (%)	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> )		类型	温度 (°C)	冷却
15	≤100	纵向	正火	350	200	27	55	65	99~143	正火 回火	900~920 600~680	空 空、炉
	>100~300		正火、 正火+回火	340	170	25	50	60				
	>300~500		正火+回火	330	150	24	45	55				
20	≤100	纵向	正火	400	220	24	53	60	103~156	正火	880~900	空
	>100~300		正火、 正火+回火	380	200	23	50	60				
	>300~500		正火+回火	370	190	22	45	60		回火	600~650	空、炉
	>500~700		正火+回火	360	180	20	40	50				
25	≤300	纵向	正火	430	240	22	50	50	110~170	正火	870~890	空
	>300~500		正火、 正火+回火	400	220	20	48	40				
	>500~750		正火+回火	390	210	18	40	40		回火	600~650	空、炉
30	≤100	纵向	正火	480	250	19	48	40	126~179	正火	880~900	空
	>100~300		正火、 正火+回火	470	240	19	46	35				
	>300~500		正火+回火	460	230	18	40	35		回火	600~650	空、炉
	>500~750		正火+回火	450	220	17	35	30				

(续表)

钢号	截面尺寸 (mm)	试样 方向	试验状态	力学性能					硬度 HB	热处理		
				$R_m$ (MPa) ≥	$R_{m2}$ (MPa) ≥	A (%) ≥	Z (%) ≥	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> ) ≥		类型	温度 (°C)	冷却
35	≤100	纵向	正火 正火、 正火+回火	520	270	18	43	35	128~187	正火 回火	860~880 600~650	空 空、炉
	>100~300			500	260	18	40	30				
	>300~500		正火、 正火+回火	480	240	17	37	30				
	>500~750			460	230	16	32	25				
	≤100		正火+回火	560	300	19	48	60	≤207	正火 回火	860~880 600~680	水、油 炉、空
	>100~300			540	280	18	40	50				
40	≤100	纵向	正火 正火、 正火+回火 正火+回火	560	280	17	40	30	≤207	正火 回火	840~860 600~650	空 炉、空
	>100~300			540	270	17	36	30				
	>300~500			520	260	16	32	25				
	>500~750			500	250	15	30	25				
	≤100		正火+回火	630	350	18	40	50	170~217	正火 回火	830~850 580~640	水 炉、空
	>100~300			600	300	17	35	40				
45	≤100	纵向	正火 正火、 正火+回火 正火+回火	600	300	15	38	30	≤207	正火 回火	830~860 580~630	空 炉、空
	>100~300			580	290	15	35	25				
	>300~500			560	280	14	32	25				
	>500~750			540	270	13	30	20				
	≤200		正火+回火	650	360	17	35	40	187~217	正火 回火	820~850 600~640	水、油 炉、空
50	≤100	纵向	正火 正火、 正火+回火 正火+回火	620	320	13	35	30	≤229	正火 回火	830~860 600~650	空 炉
	>100~300			600	300	12	33	25				
	>300~500			580	290	12	30	25				
	>500~750			560	270	12	28	20				
	≤100		正火+回火	700	400	13	34	25	≤241			
	>100~300			660	360	12	32	20				
60	≤300	纵向	正火+回火	660	330	10	25	30	175~228	正火 回火	800~820 640~660	空 炉、空
50Mn	≤100	纵向	正火+回火	650	340	13	35		≤255	正火 回火	820~840 600~650	空 空
	>100~300			620	320	12	33					
	≤60		正火+回火	800	550	8	40	35	≥229	正火 回火	820~840 600~640	油 空
	>60~100			780	500	7	35	30				

表 7-36 合金结构钢锻件热处理后的力学性能

钢号	截面尺寸 (mm)	试样方向	试验状态	力学性能					硬度 HB	热处理		
				$R_m$ (MPa) ≥	$R_{p0.2}$ (MPa) ≥	A (%) ≥	Z (%) ≥	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> ) ≥		类型	温度 (°C)	冷却
30Mn2	≤100	纵向	正火	600	300	20	50	80	≤241	正火	840~860	空
	>100~300			560	280	18	48	60				
35Mn2	≤100	纵向	正火	630	320	18	45		≤241	正火	840~860	空
	>100~300		正火+回火	590	300	18	43	30		回火	600~650	空、炉
	≤60		淬火+回火	800	650	16	50	60	229~269	淬火	800~820	水
	>60~100			760	600	16	50	60		回火	620~640	水
	>100~300			700	500	16	40	60				
45Mn2	≤100	纵向	正火	700	360	16	38		≤241	正火	830~850	空
	>100~300		正火、正火+回火	680	340	15	35			回火	590~650	空、炉
	≤60		正火+回火 淬火+回火	850	700	15	45			淬火	830~850	油
50Mn2	≤100	纵向	正火	750	400	14	35		187~241	正火	820~840	空
	>100~300		正火、正火+回火	730	380	13	33			回火	590~650	空、炉
	>300~500		正火+回火	700	360	12	30					
20MnMo	≤150	切向	正火+回火	480	270	14	40	50	179~217	正火	900~920	空
	100~300		淬火+回火	510	310	14	40	50	197~228	淬火	890~910	水+油
22MnMo (20MnMo1)	≤130	切向	正火+回火	500	300	15	40	50	145~190	正火	860~880	空
										回火	590~610	空、炉
18MnMoNb	≤115	切向	正火+回火	600	450	16	40	70	187~228	正火	940~960	空
	≤300			650	500	16	40	70		回火	630~650	空、炉
	301~500		淬火+回火	600	450	16	40	60		淬火	910~930	油、水+油
	501~800			550	400	15	35	50		回火	600~620	空、炉
20SiMn	≤120	纵向	正火+回火	550	340	32	72	80		正火	930~950	空
	>120~250			540	320	30	68	80				
	>250~400			500	280	16	35	60		回火	560~610	空、炉
35SiMn	≤100	纵向	淬火+回火	850	550	15	45	60	228~269	淬火	870~900	油
	>100~300			750	450	14	35	50	217~269			水+油
	>300~400			700	400	13	30	40	217~255	回火	580~600	油、炉
	>400~500			680	380	11	28	40	197~255			

(续表)

钢号	截面尺寸 (mm)	试样 方向	试验状态	力学性能					硬度 HB	热处理			
				$R_m$ (MPa) ≥	$R_{p0.2}$ (MPa) ≥	A (%) ≥	Z (%) ≥	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> ) ≥		类型	温度 (°C)	冷却	
55Si2MnV	≤100	纵向	淬火+回火	950	800	12	40	50	241~ 286	淬火	850~870	油	
										回火	620~640	空	
40Cr	≤100	纵向	淬火+回火	750	520	15	45	60	≤285	淬火	840~860	水、油	
	>100~200			750	500	14	42	50					
	>200~300			700	450	13	40	40	≤269	回火	540~580	空	
	300~500			630	380	10	35	30	≤255				
	>500~800			600	350	8	30	25					
35CrMo	≤100	纵向	淬火+回火	750	550	15	45	60	228~ 269	淬火	840~860	油	
	>100~300			700	500	15	45	50					
	>300~500			650	450	15	35	40	217~ 255	回火	600~620	空	
	>500~800			600	400	12	30	30					
34CrMo1	≤1 000	纵向	正火+回火	580	350	17	40	60	179~ 229	淬火	870~890	空	
										回火	640~660	炉、空	
30CrMnSi	≤100	纵向	正火+回火	650	400	16	40	30	≤229	淬火	860~880	水、油	
	>100~200			600	350	16	40	30	≤229				
	≤100		纵向	淬火+回火	850	600	16	35	60	241~ 285	回火	620~640	水
	>100~200				720	470	16	35	50	229~ 269			
45CrV	400~600	纵向	淬火+回火	800	600	12	40	30	241~ 285	淬火	850~870	油	
	>600~900			750	520	10	38	25	229~ 269	回火	540~590	炉	
37SiMn2MoV (35SiMnMoV)	≤100	纵向	淬火+回火	900	750	14	40	50	241~ 285	淬火	870~ 890	油	
	>100~300			850	700	14	40	50					
	>300~500			800	650	14	40	50	220~ 269	回火	630~ 650	空	
	>500~700			750	600	14	40	40					
42MnMoV	≤100	纵向	淬火+回火	800	650	12	40	50	241~286	淬火	830~850	油、 水+油	
	>100~300			750	600	12	40	50					
	>300~500			700	550	12	35	40	228~269	回火	580~650	空	
	>500~700			650	500	12	35	30					
34CrNiMo	≤100	纵向	淬火+回火	870	750	15	45	70	≤321	淬火	850~870	油	
	>100~300			780	650	14	40	60					
	>300~500			700	550	14	35	50		回火	560~640	炉	
	>500~800			650	500	14	32	40					

(续表)

钢号	截面尺寸 (mm)	试样方向	试验状态	力学性能					硬度 HB	热处理		
				$R_m$ (MPa) ≥	$R_{p0.2}$ (MPa) ≥	A (%) ≥	Z (%) ≥	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> ) ≥		类型	温度 (°C)	冷却
34CrNi3Mo	≤100	纵向	淬火+回火	920	800	14	40	70	表面 264~341	淬火	850~870	油
	>100~300			870	750	14	38	60				
	>300~500			820	700	13	35	50	表面 262~321			
	>500~800			750								
	>800~1000			700					表面 241~302			
18Cr2Ni4W	25	纵向	一次淬火+二次淬火+回火	1150	850	12	50	100		一次淬火	950	空
										二次淬火	850	空
										回火	160	空
	≤150	纵向	淬火+回火	1150	850	11	40	90	表面 332~387	淬火	860~870	空
										回火	150~170	油
										淬火	860~870	空
										回火	550~570	油

表 7-37 不锈钢和耐酸钢热处理后的力学性能

钢号	截面尺寸 (mm)	试样方向	力学性能					硬度 HB	热处理		
			$R_m$ (MPa) ≥	$R_{p0.2}$ (MPa) ≥	A (%) ≥	Z (%) ≥	$a_k$ (J/cm <sup>2</sup> ) ≥		类型	加热温度 (°C)	冷却
12Cr13	≤60	纵向	600	420	20	60	90	187~217	淬火+回火	1000~1050	油、水
										700~790	油、水、空
20Cr13	≤100	纵向	660	450	16	55	80	97~248	淬火+回火	1000~1050	油、空
										680~720	空
30Cr13	≤100	纵向	850	650	12	45	50	≥241	淬火+回火	1000~1050	油
		切向	850	650	10	30	40			600	空
2Cr18Ni9Ti	≤60	纵向	650	250	40	50	100	207~341	固溶	1050~1100	水
	>60~100		600	240	35	40	80				
	>100~200		580	220	30	—	60				
1Cr18Ni9Ti	≤60	纵向	550	220	40	55	100	≤192	固溶	1050~1150	水
	>60~100		540	200	38	50	80				
	>100~200		500	200	25	30	60				



## 2) 回火的加热与保温

(1) 回火入炉温度及停留时间：高合金钢大锻件，入炉温度可选择在  $B_f$  点或  $M_s$  点附近，停留时间应使过冷奥氏体得到充分转变。碳钢和低合金钢锻件，在淬火冷却过程中过冷奥氏体转变已基本完成，回火入炉后的停留只是为了减少锻件的内外温差、降低锻件中的内应力。

(2) 升温、均温和保温：升温速度一般控制在  $30\sim 100^\circ\text{C}/\text{h}$ 。保温时间一般淬火后的回火取  $2\text{ h}/100\text{ mm}$ ，正火后的回火取  $1.5\text{ h}/100\text{ mm}$ ，总保温时间不得小于  $4\text{ h}$ 。

### (3) 回火冷却及消除应力回火：

大锻件高温回火后快冷会引起大的残留应力，一些重要锻件回火后的残留应力最高允许值  $\leq 10\%R_{p0.2}$ 。

残留应力的大小和回火冷却方法有关，试验表明空冷比炉冷残留应力大  $30\%$  左右，油冷比空冷大  $50\%\sim 100\%$ ，水冷比空冷大  $150\%\sim 200\%$ 。对残留应力没有要求的大锻件，回火后一般采用在静止空气中冷却，冷却速度在  $400^\circ\text{C}$  以上为  $30\sim 50^\circ\text{C}/\text{h}$ ， $400^\circ\text{C}$  以下随炉冷却，冷至  $250^\circ\text{C}$  左右出炉。

重要的大型锻件大多采用对回火脆性不敏感，含有钼和钨的合金钢来制造。有第二类回火脆性的材料，应尽可能采用油冷，并在回火后再经  $400\sim 450^\circ\text{C}$  补充作去应力回火。

一些重要的锻件不仅在调质处理后要求尽可能低的残留应力，而且要求在最后的精加工前能消除前一道加工时形成的加工应力，需进行去应力回火，工艺见图 7-42 及表 7-38。

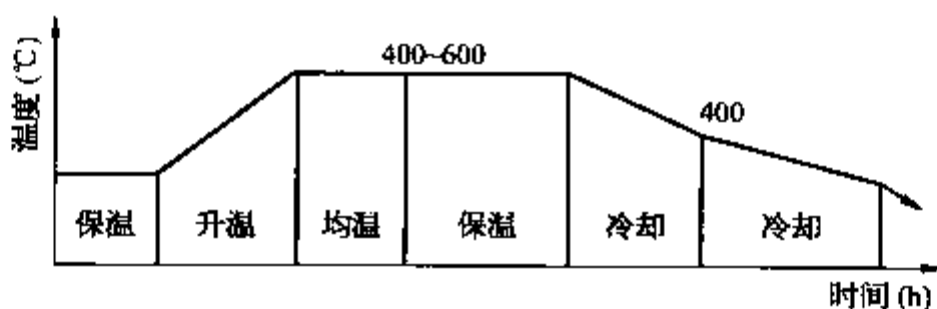


图 7-42 一般锻件精加工前去应力回火工艺曲线

表 7-38 一般锻件精加工前去应力回火工艺参数

截面 (mm)	装炉温度 ( $^\circ\text{C}$ )	保温 (h)	升温 ( $^\circ\text{C}/\text{h}$ )	均温	保温 (h)	冷却 ( $^\circ\text{C}/\text{h}$ )	冷却	出炉温度 ( $^\circ\text{C}$ )
$\leq 250$	$\leq 400$	—	$\leq 100$	实测	6~8	50	随炉冷却	$\leq 300$
251~500	$\leq 350$	1~2	$\leq 80$		8~12	40		$\leq 250$
$> 500$	$\leq 250$	2~3	$\leq 60$		12~14	30		$\leq 200$

注：1. 调质件消除应力回火温度，应比调质时回火温度低  $20\sim 30^\circ\text{C}$ ；

2. 对有回火脆性的材料，消除应力回火温度为  $400\sim 450^\circ\text{C}$ ，保温时间应适当延长。

## 二、轧辊热处理

轧辊按工作状态可分为热轧辊和冷轧辊。按所起的作用可分为工作辊、中间辊和支承辊。按材质可分为锻辊和铸辊（冷硬铸铁）。不同的用途、不同类型的轧辊处在各自特定的工况条件下，其性能要求见表 7-39。

表 7-39 不同轧辊的性能要求

轧辊类型	主要性能要求	辊身硬度	工作温度 ( $^\circ\text{C}$ )	主要失效形式
热轧工作辊	抗热疲劳裂纹性能，抗表面粗糙性能	196~302 HB	室温~850	在周期性交变热应力作用下，产生热疲劳裂纹。严重情况下，裂纹扩展可能造成辊面剥落，甚至断辊
冷轧工作辊	高硬度，耐磨性，抗疲劳剥落性能	90~105 HS	室温~180	划伤、粘辊和剥落

(一) 热轧锻钢工作辊热处理

1. 热轧锻钢工作辊用钢及热处理工艺参数(表 7-40)

表 7-40 常用热轧工作辊用钢及热处理工艺参数

钢 号	热 处 理 工 艺		
	正火温度(°C)	淬火温度(°C)	回火温度(°C)
55Cr	840~850	820~840	590~630
60CrMo	840~860	860~870	600~660
60CrMoV	890~910	860~880	600~680
60CrMnMo	820~840	860~870	650~680
60SiMnMo	810~830	830~850	570~650
70Cr3Mo	810~880	860~880	—

2. 热轧锻钢工作辊的热处理方法

热轧锻钢工作辊进行的热处理一般有锻后热处理(包括有些钢的消除白点退火)和调质。

1) 锻后热处理 锻后热处理的主要目的是消除锻后应力、细化晶粒和改善切削性能。锻后热处理还有扩氢作用。扩氢时间视钢锭氢含量而定,一般认为 $[H] \leq 2 \times 10^{-4} \%$ 时,可取消扩氢处理。其锻后热处理工艺见图 7-43 及表 7-41。

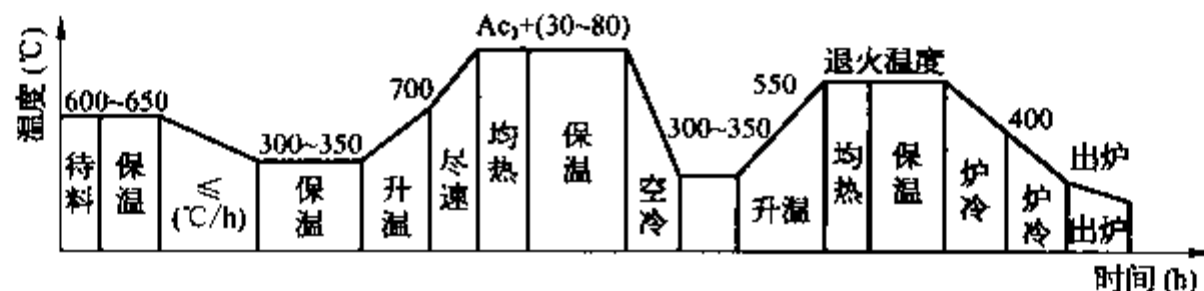


图 7-43 热轧工作辊锻后热处理曲线

表 7-41 热轧工作辊锻后热处理参数

辊身直径 (mm)	保温	冷速 (°C/h) ≤	保温	升温 (°C/h) ≤	保温	升温 (°C/h) ≤	保温	炉冷 (°C/h) ≤	炉冷 (°C/h)	出炉 (°C)
≤600	0.5 h 100 mm	40	2 h 100 mm	60	1.5~1.8 h 100 mm	60	12 h 100 mm	50	20	150
601~800				50		50		40	15	120
801~1 000		30	40	40	30	10		100		
≥1 000										

2) 调质 热轧锻钢工作辊的最终热处理是调质。调质的目的是保证轧辊表面获得规定的硬度和力学性能,并保证心部具有足够的韧性。调质工艺见图 7-44 及表 7-42。

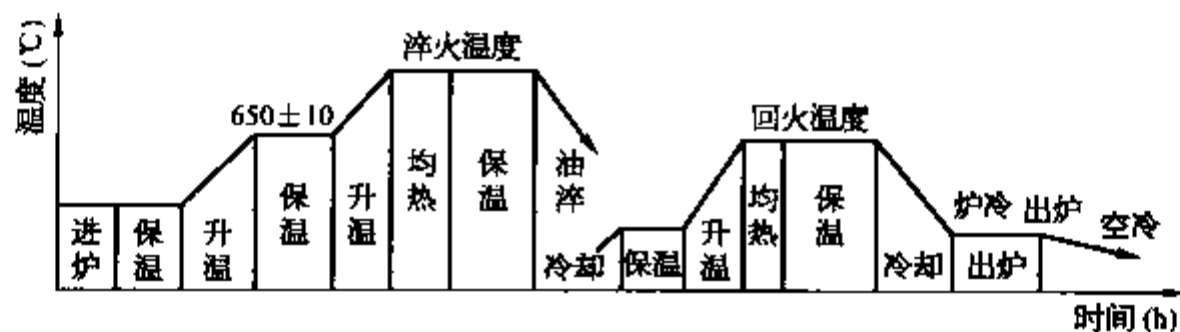


图 7-44 热轧锻钢工作辊调质工艺曲线

表 7-42 热轧锻钢工作辊调质工艺参数

有效厚度 (mm)	进炉温度 (°C) ≤	保温 (h)	升温 (°C/h) ≤	保温	升温 (°C/h) ≤	均热	保温	冷却	保温 (h)	升温 (°C/h) ≤	均热	保温	冷却 (°C/h) ≤	出炉温度 (°C) ≤
≤600	350	2~3	40	2~3	70	目测	0.8~1.0 h	20 min 100 mm	2~3	60	目测	2.5~13 h 100 mm	30	300
601~800	450	2~3		3~4					3~4				60	30
801~1 000	400	3~4	30	4~5	60				4~5	50			20	250
≥1 000	350	4~5		5~6	50				5~6	40			20	250

(二) 冷轧锻钢工作辊热处理

1. 冷轧锻钢工作辊用钢及热处理工艺参数(表 7-43)

表 7-43 常用冷轧工作辊用钢及工艺参数

钢 号	热 处 理		
	正火温度(°C)	淬火温度(°C)	回火温度(°C)
9Cr	880~910	880~890	660~710
9Cr2	860~890	880~890	660~710
9Cr2Mo	830~860	880~890	700~760
9Cr2W	870~900	880~890	700~760

2. 冷轧锻钢工作辊的热处理方法

冷轧锻钢工作辊的热处理一般有锻后热处理、调质和表面淬火。

1) 锻后热处理 锻后热处理的目的是降低硬度、消除残余应力、改善组织、得到细粒珠光体和消除网状碳化物,锻后热处理还有扩氢作用。当[H]≤2×10<sup>-4</sup>%时,可取消扩氢处理。冷轧工作辊锻后热处理工艺见图 7-45及表 7-44。

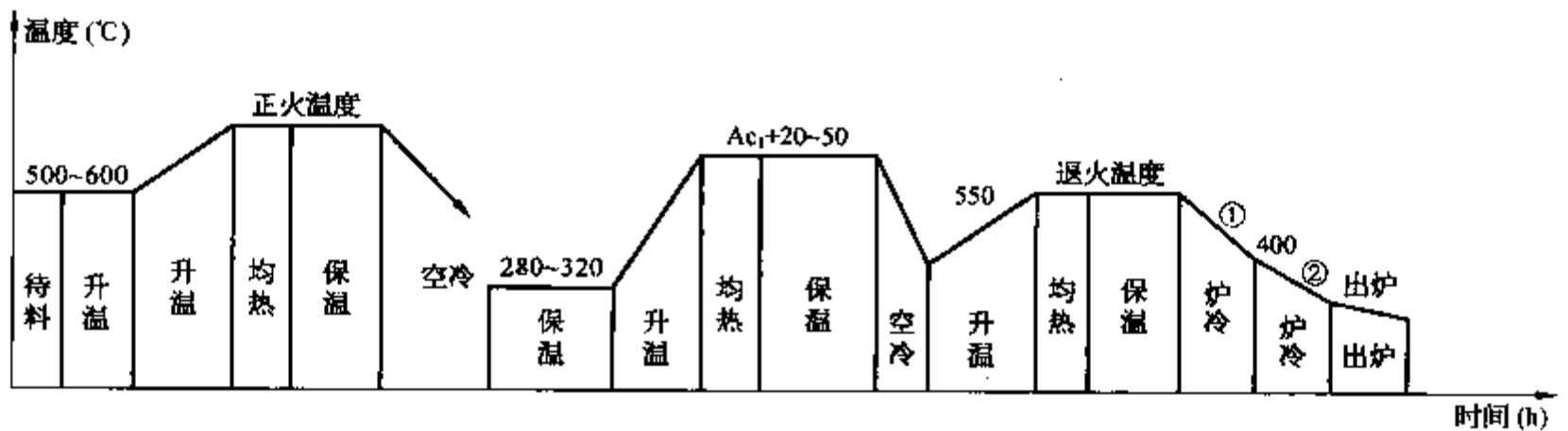


图 7-45 冷轧锻钢工作辊锻后热处理曲线

表 7-44 冷轧锻钢工作辊后热处理参数

辊身直径 (mm)	升温 (°C/h) ≤	升温	均热	保温	空冷	保温	升温 (°C/h) ≤	保温	升温 (°C/h) ≤	保温	炉冷① (°C/h) ≤	炉冷② (°C/h) ≤	出炉温度 (°C)
≤400	0.5 h 100 mm	X					60	1.5 h	60	12 h	50	15	150
101~300							50	100 mm	50	100 mm	40	10	120
>800	1 h 100 mm	50		1.5 h 100 mm		1.5 h 100 mm	40	1.5 h 100 mm	40	14 h 100 mm	30	10	100

2) 调质 调质的目的是为表面淬火提供组织准备,使辊颈和辊心得到强韧性配合良好的粒状珠光体组织,以承受激烈的表面淬火。冷轧锻钢工作辊锻后调质处理工艺见图 7-46 及表 7-45。

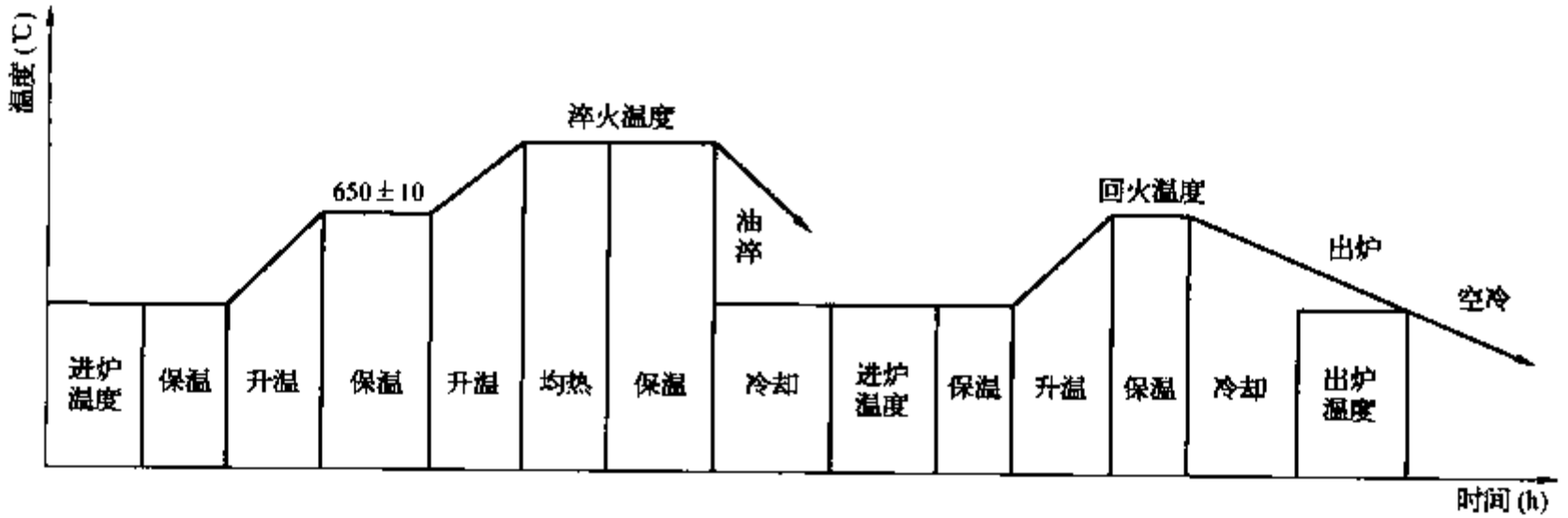


图 7-46 冷轧锻钢工作辊锻后调质工艺曲线

表 7-45 冷轧锻钢工作辊锻后调质工艺参数

有效厚度 (mm)	进炉温度 (°C) ≤	保温 (h)	升温 (°C/h) ≤	保温 (h)	升温 (°C/h) ≤	均热	保温	冷却 (min)	进炉温度 (°C) ≤	保温 (h)	升温 (°C/h) ≤	保温	冷却速度 (°C/h) ≤	出炉温度 (°C) ≤	
≤200	500	1	60	1	80	目 测	1~1.2 h 100 mm	25~30	450	1	60	4~5 h 100 mm	30	400	
210~300	450	2		2				30~40	400	2	60		30	400	
301~400	400	2		2				45~55	350	2	50		30	350	
401~500	350	2	50	3	60~70			300	2.5	50	20		300		
501~600	300	3	40	3	70			75~90	250	3	40		20	200	
601~700		3		4				85~105	250	4	40		20	200	
701~800		3		4				98~135	250	4	40		20	200	
801~900		4		5				5	115~155	250	5		40	20	200

3) 表面淬火 工作辊表面淬火按加热方法可分整体快速加热淬火法和连续感应淬火法,后者在生产实践中应用更广。

连续式感应淬火方法中的双频感应淬火,使用两种不同频率的感应器匹配进行感应加热。典型的双频淬火装备以电流透入深度较大的工频感应器作为主感应器,实现深层加热,均热一段时间后,再使用一个中频感应器,以得到较深的经过等温的奥氏体化层,淬后获得所需的淬硬层深度。中频电源以 250 Hz 为佳,也有使用 500 Hz、1 000 Hz、1 200 Hz 和 2 500 Hz 的。中频感应器的功率一般为工频感应器的 1/4~1/2。

4) 回火 冷轧工作辊淬火后应及时回火,回火温度根据要求的辊身表面硬度而定。一般来说,硬度要求大于 90 HS 时,回火温度为 140~150°C;硬度为 70~85 HS 时,回火温度为 310~330°C。辊身硬度大于 95 HS 的轧辊,在精车和粗磨后应进行第二次回火,回火温度比第一次低 10°C。

### (三) 冷硬铸铁轧辊热处理

#### 1. 常用冷硬铸铁轧辊材料

冷硬铸铁即利用铁水自身过冷度和模具表面激冷的办法,在铸铁辊身表面激冷生成硬度高、耐磨性好的白口层。普通冷硬铸铁轧辊主要用于叠轧薄板轧机、三辊中板轧机、线材轧机、棒材轧机及型钢轧机用辊。高镍铬无限冷硬铸铁轧辊被广泛用来制造宽、中、厚板轧机和带钢轧机精轧用辊。常用冷硬铸铁轧辊的化学成分见表 7-46。

表 7-46 冷硬铸铁轧辊的化学成分和性能

材 质	化学成分(质量分数,%)										硬度 HSD			抗拉强度 (MPa)	
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Mg	辊身	辊颈		均匀度
铬钼冷硬	2.90~3.60	0.25~0.80	0.20~1.00	≤0.40	≤0.10	0.20~0.60		0.20~0.60				58~70	32~48	≤5	≥150
镍铬钼冷硬	2.90~3.60	0.25~0.80	0.20~1.00	≤0.35	≤0.10	0.20~0.60	0.50~1.50	0.20~0.60				60~72	32~48	≤5	≥150
铬钼系无限	2.90~3.60	0.60~1.20	0.40~1.20	≤0.25	≤0.10	0.60~1.20		0.20~0.60				58~70	32~48	≤5	≥160
镍铬钼系无限	2.90~3.60	0.60~1.30	0.40~1.20	≤0.25	≤0.10	0.70~1.30	0.50~1.50	0.20~0.60				60~72	32~48	≤5	≥160
铬钼系球墨半冷硬	2.90~3.60	1.20~2.00	0.40~1.20	≤0.25	≤0.03	0.20~0.60		0.20~0.60		0.00~1.00	≥0.04	40~55	32~48	≤8	≥300
铬钼球墨无限冷硬	2.90~3.60	1.30~2.50	0.40~1.20	≤0.25	≤0.03	0.20~0.60		0.20~0.60		0.00~1.00	≥0.04	55~70	35~50	≤5	≥300
镍铬钼球墨无限冷硬	2.90~3.60	1.30~2.50	0.40~1.20	≤0.25	≤0.03	0.30~1.20	0.50~1.50	0.20~0.60			≥0.04	58~70	35~50	≤5	≥300
铬钼系球墨复合	2.90~3.60	0.40~1.20	0.20~1.00	≤0.45	≤0.03	0.10~0.80	0.00~1.50	0.20~0.80	0.00~0.30	0.00~1.00	≥0.04	58~70	32~48	≤5	≥300

注：含有稀土元素的球墨铸铁轧辊，残镁量不得小于  $\omega_{Mg} 0.03\%$ 。

2. 常用冷硬铸铁轧辊的热处理工艺

铸铁轧辊需进行去应力退火、石墨化退火、正火和回火等工艺。

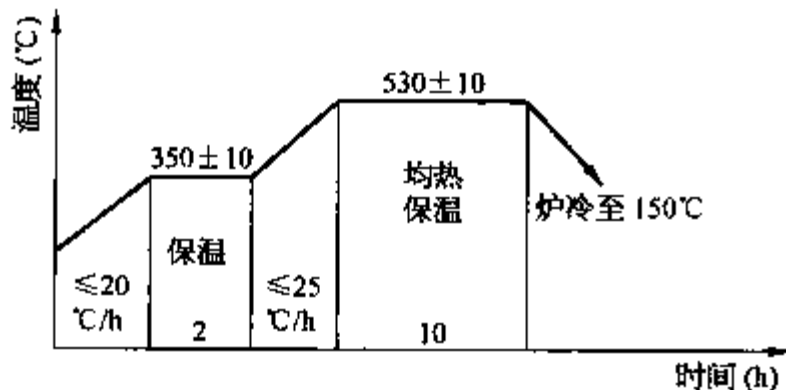


图 7-47 冷硬铸铁轧辊低温退火工艺曲线

1) 去应力退火 铸铁轧辊在浇注后的冷却过程中，各部位通过塑性到弹性变形温度的时间不同，冷却过程中轧辊发生石墨化和相变时的体积变化，这两个因素使轧辊由表面至中心出现很大的应力。低温退火可在短时间内有效地消除轧辊内应力。直径 200~400 mm 的铬钼冷硬铸铁的低温退火工艺曲线见图 7-47。

2) 石墨化退火 为了消除球墨铸铁铸态组织中出现的大量的共晶渗碳体或自由渗碳体，需要采取高温石墨化退火工艺。当原始组织中的自由渗碳体少于

8%，其组织为铁素体+珠光体+石墨或珠光体+石墨，欲获得铁素体基体的球墨铸铁，则采用低温石墨化退火工艺。

3) 正火 正火按加热温度不同，可分为高温完全奥氏体化正火和中温部分奥氏体化正火。

(1) 高温完全奥氏体化正火：加热温度为  $A_{c3}$  以上某个温度范围（一般在 900~960℃），经保温后基体全部变为奥氏体，然后出炉空冷、风冷或喷雾冷却，获得珠光体或索氏体基体。若辊径较大，正火冷却速度不足于抑制二次渗碳体的析出，可增加一次正火。

(2) 中温部分奥氏体化正火：加热温度为  $A_{c1} \sim A_{c3}$  范围内（约 800~880℃），保温一段时间后空冷。由于奥氏体化的温度较低，金属基体中存在少量分散分布的铁素体，具有一定的综合力学性能。

正火后的轧辊一般要进行回火处理。回火时的升温速度应  $\leq 20^\circ\text{C}/\text{h}$ ，若升温速度过快，易产生新的热应力与原有应力叠加使轧辊断裂。

### 三、大型重载齿轮渗碳淬火

#### (一) 重载齿轮的服役条件与失效形式

齿轮是传递能量的部件,相互啮合的齿轮,其工作齿面做相对滑移,承受交变冲击、弯曲、接触应力和摩擦力。常见的失效形式有过载断齿、齿面磨损、齿形扭曲、齿面点状剥落或豆状剥落(称为点蚀)。常采用渗碳淬火热处理来提高齿轮的承载能力、轮齿的表面压应力,从而有效地提高抗弯曲疲劳强度及接触疲劳强度。

#### (二) 重载齿轮的热处理质量控制

重载齿轮的热处理质量,主要是指齿面硬度、淬硬层深度、心部硬度、渗碳层和心部组织等。

##### 1. 随炉试棒

随炉试棒有轮齿仿形试样或圆柱体试棒,通常采用圆柱体试棒。圆柱体试棒分渗碳淬火和心部硬度试棒各一件,与齿轮一起渗碳和淬回火。根据美国的 AGMA 标准,推荐圆柱体试棒尺寸见表 7-47。

表 7-47 圆柱体试棒尺寸

渗碳淬火试棒		心部硬度试棒	
适用模数 $m(\text{mm})$	试棒尺寸 $(\text{mm})$	适用模数 $m(\text{mm})$	试棒尺寸 $(\text{mm})$
$m \leq 5.7$	$\phi 16 \times 50$	$m \leq 5.7$	$\phi 36 \times 76$
$5.7 < m \leq 16.9$	$\phi 25 \times 50$	$5.7 < m \leq 10.2$	$\phi 57 \times 130$
		$10.2 < m \leq 16.9$	$\phi 76 \times 180$
$m > 16.9$	$\phi 35 \times 70$	$m > 16.9$	$\phi 89 \times 205$

##### 2. 齿面硬度与淬硬层深度

齿面硬度在齿轮的齿面上测试,一般为 58~62 HRC。当难以进行齿面测试时,允许以齿顶硬度代替。有效淬硬层深度在渗碳淬火试棒上进行测试。根据 GB9450《钢件渗碳淬火硬度层深度的测定和校核》标准,除非另有协议,一般测试从表面至 550 HV1 处。

##### 3. 渗碳淬火齿轮的金相组织

渗碳淬硬层的显微组织在渗碳淬火试棒上进行测试。根据 JB/T6141.3《重载齿轮 渗碳金相检验》标准,马氏体与残留奥氏体 1~4 级合格,残留奥氏体量小于 30%,碳化物 1~3 级合格,表面脱碳层不大于 0.1 mm。表面非马氏体组织的深度控制范围见表 7-48。

表 7-48 表面非马氏体组织深度

模数 $m(\text{mm})$	$m \leq 5.7$	$5.7 < m \leq 10.2$	$10.2 < m \leq 16.9$	$m > 16.9$
表面非马氏体组织深度 $(\text{mm})$	0.02	0.02	0.025	0.03

##### 4. 心部组织和硬度

心部组织和硬度在心部硬度试棒上进行测试,沿试棒长度方向 1/2 切开,在离圆周表面 2/3R 处测试。心部组织为低碳马氏体或下贝氏体加少量游离铁素体 1~4 级合格。心部硬度依齿轮模数而异,模数  $\leq 10.2$  硬度要求 30~40 HRC;模数  $> 10.2$  硬度要求 28~33 HRC。

#### (三) 大型重载齿轮渗碳淬火工艺

##### 1. 材料与热处理技术要求

某大型重载齿轮见图 7-48,材料为 20CMnMo。

技术要求: 渗碳淬硬层深度 4.13~4.57 mm,齿面硬度 58~62 HRC,马氏体与残留奥氏体 1~4 级,碳化物 1~3 级,心部组织 1~4 级,心部硬度 28~33 HRC。试棒尺寸  $\phi 35 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$  及  $\phi 89 \text{ mm} \times 205 \text{ mm}$ 。

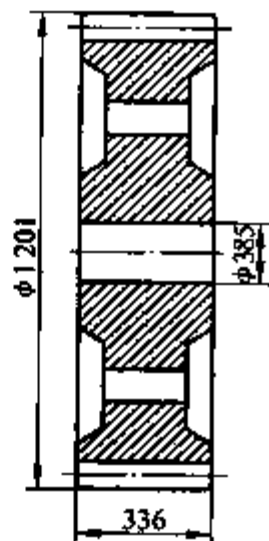


图 7-48 齿轮简图

## 2. 齿轮制造工艺流程

锻件—粗车毛坯—超声波探伤—正火—粗车—超声波探伤—滚齿—渗碳、淬火、回火—喷丸—精加工—磨齿—磁粉探伤。

## 3. 渗碳淬火工艺

渗碳工艺曲线见图 7-49, 淬火、回火工艺曲线见图 7-50。

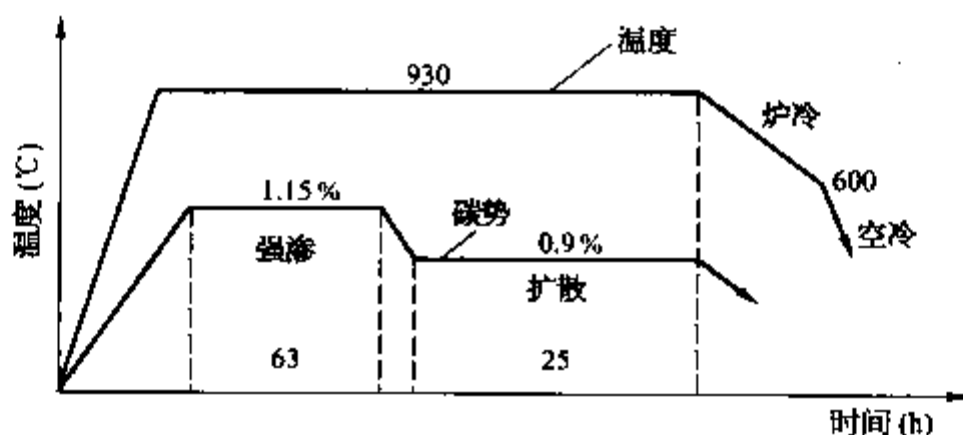


图 7-49 渗碳工艺

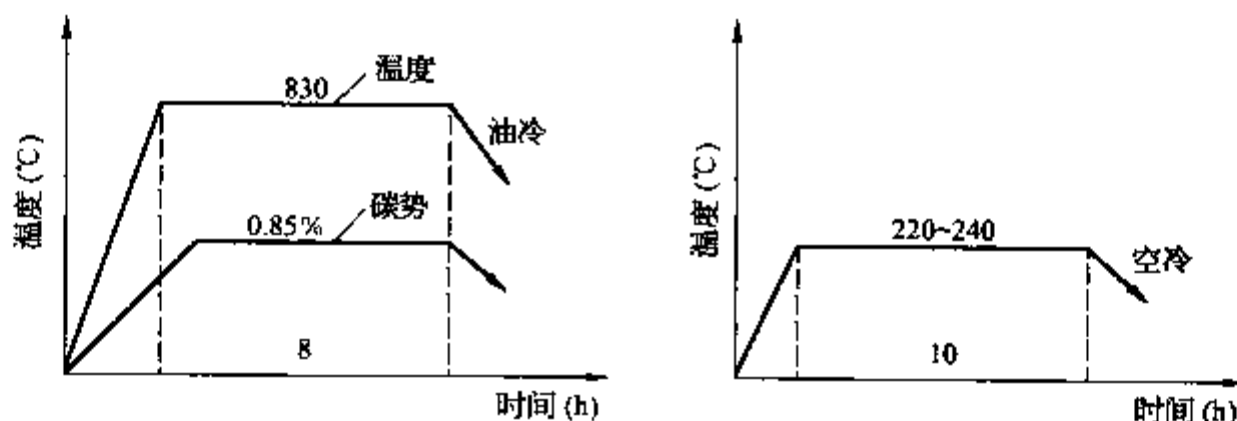


图 7-50 淬火、回火工艺

## 四、汽轮机零件的热处理

汽轮机是火力和核能发电机组中,将热能转变为机械能,再由机械能转变成电能的大型机械装备。汽轮机零件长期在高温、高压、高速、变负荷的工作条件下运行,使用的材料有碳素钢、合金结构钢、热强钢、不锈钢、工具钢、高温合金等。

### (一) 汽轮机零件的常用热处理工艺

汽轮机零件的常用热处理工艺有退火、正火、淬火、回火、固溶、时效、去应力和表面热处理工艺等。

(1) 退火:一般用于硬度要求较低的静止状态下工作的零件,如汽封环专用 1Cr12Mo 不锈钢以及用马氏体不锈钢制造的零件锻后热处理,目的在于防止开裂,便于进行机加工。

(2) 正火+回火:一般用于碳钢、低合金钢制造而对力学性能要求不高的零件以及大型铸钢件。

(3) 淬火+回火(调质或淬硬处理):用于合金结构钢和不锈钢制造对力学性能要求较高零件的热处理,如叶片、螺栓、阀杆等。

(4) 固溶+时效:用于高温合金(如 GH4145)、沉淀硬化不锈钢(如 05Cr17Ni4Cu4Nb)零件的热处理,对奥氏体不锈钢如 1Cr18Ni9Ti 等仅作固溶处理,以提高抗晶间腐蚀的能力。

(5) 去应力处理:一般用于精度要求高的零件,以消除加工过程中产生的应力,保证尺寸的稳定性。

(6) 化学热处理。汽轮机零件中常用气体渗氮,用于要求表面耐磨且精度高的零件,适用钢种除 38CrMoAlA,还大量适用 25Cr2MoVA 和 2Cr12NiMo1W1V 等。对非渗氮面,合金结构钢采用阻渗涂料进行保护,不锈钢采用加放余量、渗氮后剥去渗氮层的方法。

(7) 表面淬火:一般用于局部淬硬的零件,采用感应淬火(轴类零件表面、内孔、叶片等)或火焰淬火(形状

不规则的平面单面淬硬,一面浸水,另一面加热)的方法。

凡是经过热处理的汽轮机零件,必须根据零件的重要性和热处理工艺,按检测项目分五个组别进行,见表 7-49。

表 7-49 汽轮机零件热处理后的检验组别

检验组别	说 明
I	按工艺验收,如对一般零件的退火正火去应力后的检验
II	对硬度进行抽检,如调质零件经热处理后的检验
III	逐件进行硬度检查,如重要螺栓经调质后均需 100% 进行硬度检查
IV	对力学性能进行抽检,如调质后的螺栓阀杆等
V	逐件进行力学性能检查,如转子叶轮大型铸钢件等

除了常规的试验项目,对有些特殊零件和特殊的工艺还必须增加验收项目,如 FATT50、冷弯试验、残留应力测定等。

(二) 部分汽轮机零件的热处理

1. ZG15Cr2Mo1 钢制主汽门阀壳(图 7-51)

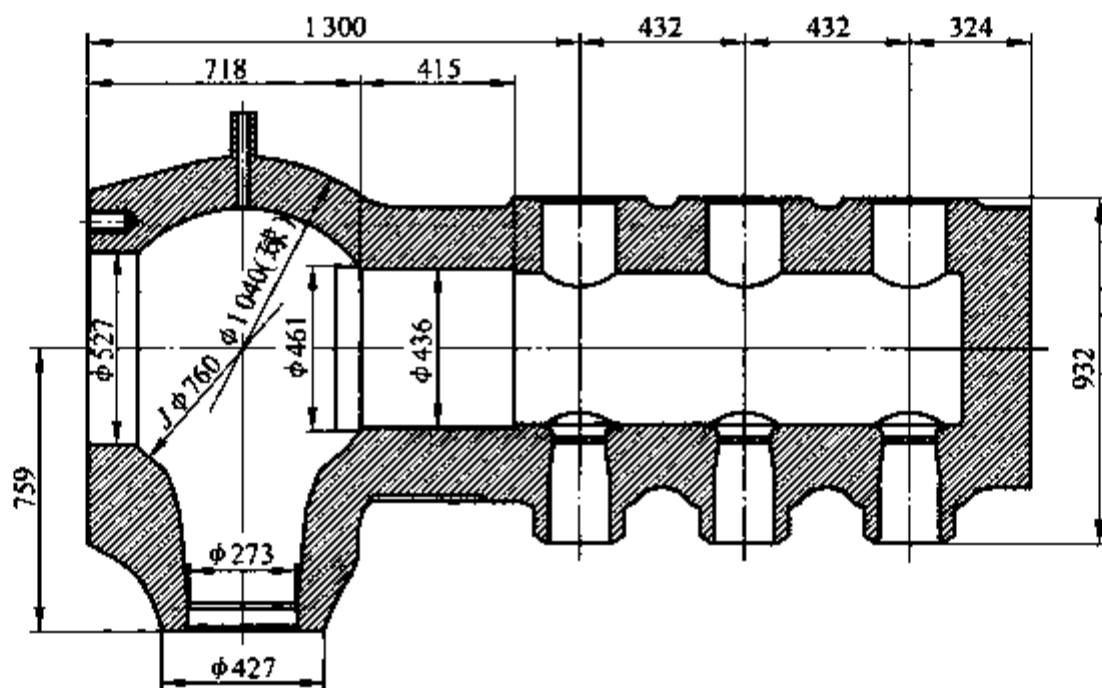


图 7-51 主汽门阀壳简图

热处理后的性能要求见表 7-50。

表 7-50 主汽门阀壳热处理后的性能要求

标 准	$R_{\sigma 0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_4$ (%)	$Z$ (%)
JB/T7024--93	$\geq 275$	485/660	$\geq 20$	$\geq 35$

制造工艺流程: 铸造—去应力处理—粗加工—性能热处理—焊补、粗加工—去应力处理—半精加工—堆焊 12Cr13—去应力处理—精加工。

主汽门阀壳的热处理工艺: 铸件去应力处理工艺曲线见图 7-52, 性能热处理工艺(正火 + 回火)曲线见图 7-53, 粗加工及堆焊后去应力处理工艺曲线见图 7-54。

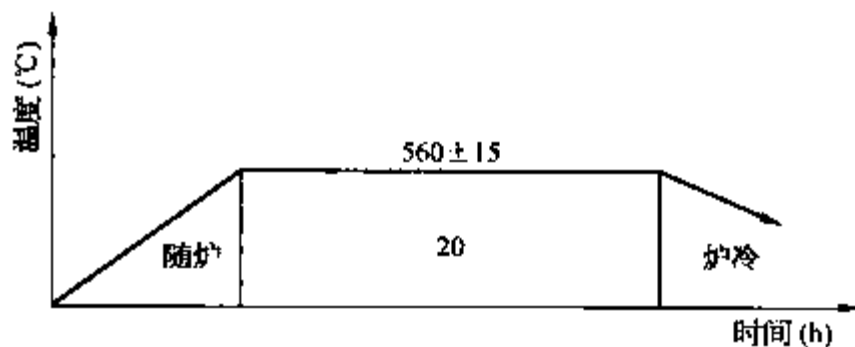


图 7-52 铸件去应力处理工艺曲线



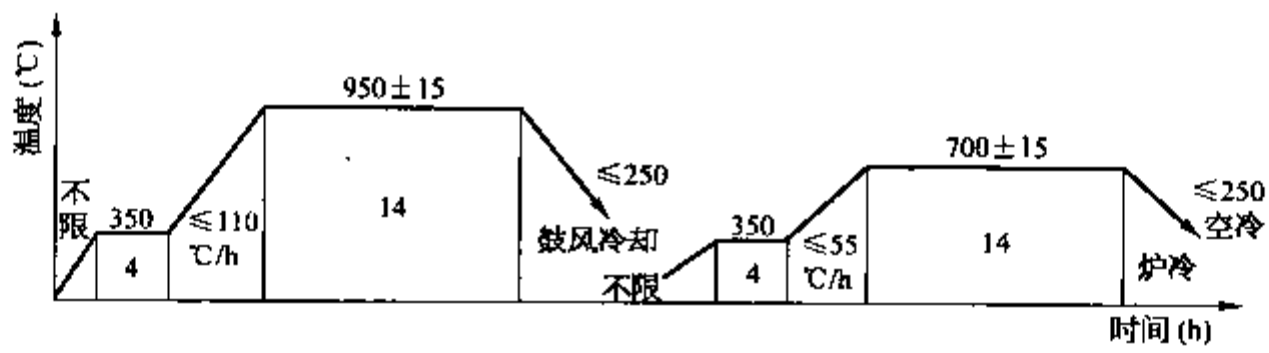


图 7-53 性能热处理工艺曲线

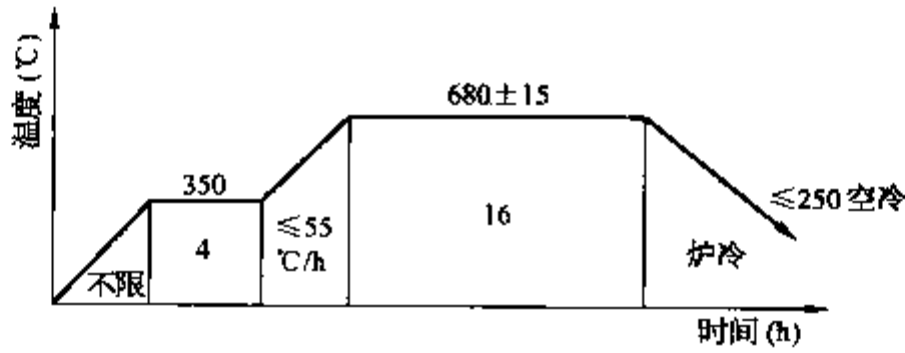


图 7-54 主汽门阀壳去应力处理工艺曲线

2. 2Cr12NiMo1W1V 制阀杆(图 7-55)

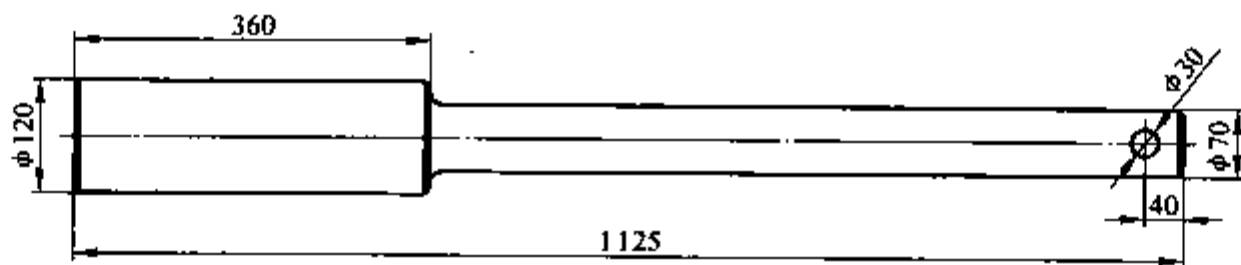


图 7-55 制阀杆简图

性能热处理(调质)技术要求见表 7-51。

表 7-51 性能热处理(调质)技术要求

$R_{\text{m},2}$ (MPa)	$R_{\text{m}}$ (MPa)	$A_1$ (%)	Z (%)	HB	铁素体量 (%)
$\geq 760$	$\geq 930$	$\geq 14$	$\geq 32$	277/331	$< 10$

制造工艺流程：锻造—退火—粗加工—性能热处理—机加工—去应力处理—精加工—渗氮—精加工。

阀杆的热处理工艺：阀杆属于细长零件，在整个热处理过程中，为防止弯曲变形，必须对装炉方式和装炉数量作出严格规定(如在井式炉中垂直悬挂，装炉数量每层不超过 8 根等)。

阀杆锻后退火工艺曲线见图 7-56；性能热处理(调质)工艺曲线见图 7-57；去应力处理工艺曲线见图 7-58；渗氮处理工艺曲线见图 7-59。渗氮技术要求见表 7-52。

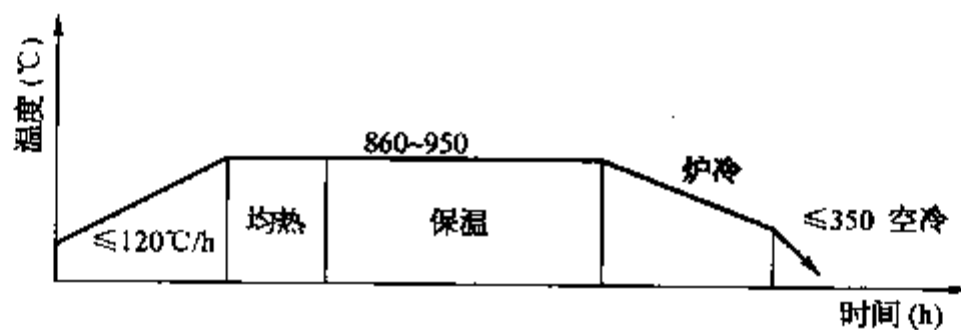


图 7-56 阀杆锻后退火工艺曲线



图 7-57 调质处理工艺曲线

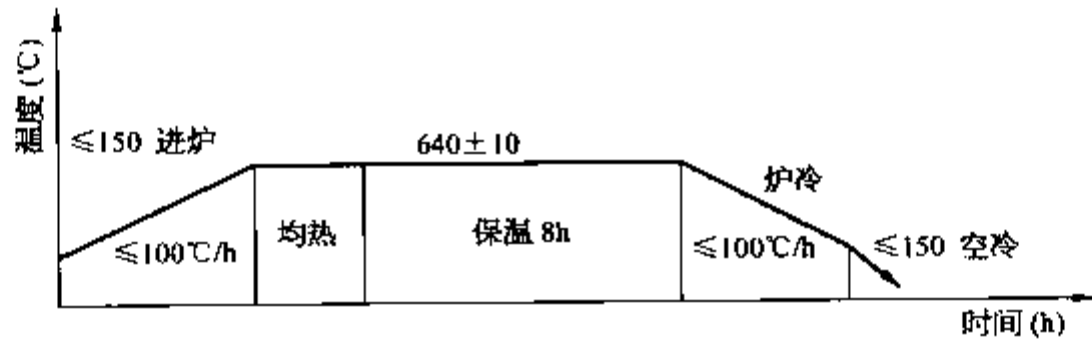


图 7-58 去应力处理工艺曲线

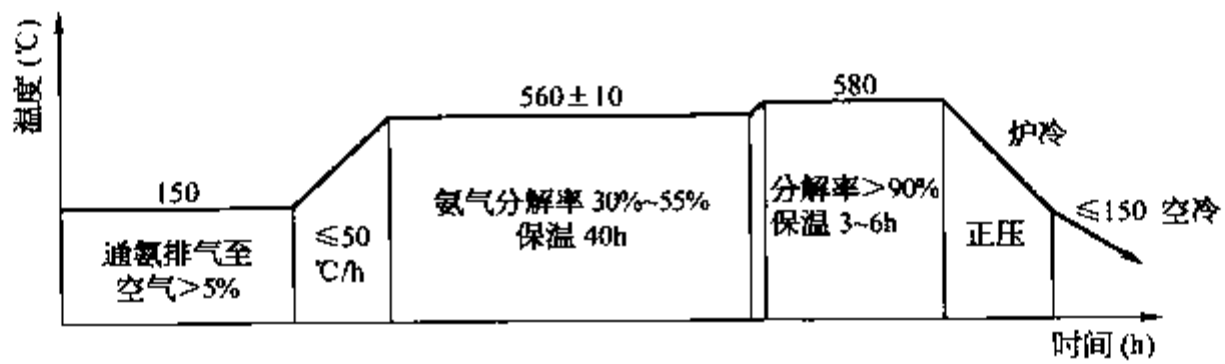


图 7-59 渗氮处理工艺曲线

表 7-52 渗氮技术要求

硬度 HV	深度(mm)	脆性
≥800	0.20~0.35	≤3级

3. 25Cr2MoVA 制高温螺栓(图 7-60)

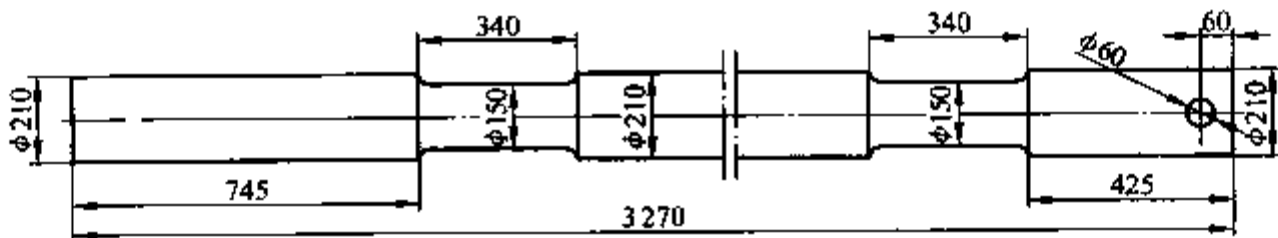


图 7-60 高温螺栓

汽轮机重要螺栓用材料根据其工作的状态有 35CrMoA、42CrMo、25Cr2MoVA、20Cr1Mo1VNbTiB、2Cr12NiMo1WiV、2Cr11NiMoNbVN、GH4145 等。螺栓的规格从 M30 到 M160 不等,大尺寸的螺栓长度超过 2 m,重达 300 余千克。

制造工艺流程:锻造—正火—粗加工—性能热处理—半精加工—去应力处理—精加工。

高温螺栓的热处理工艺:锻后正火+回火工艺曲线见图 7-61;性能热处理(调质)工艺曲线见图 7-62;去应力处理工艺曲线见图 7-63。性能热处理技术要求见表 7-53。

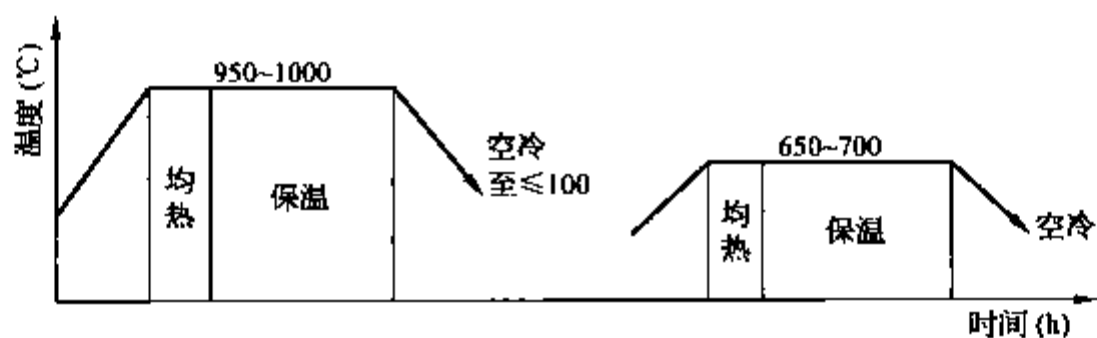


图 7-61 辊后正火+回火工艺曲线

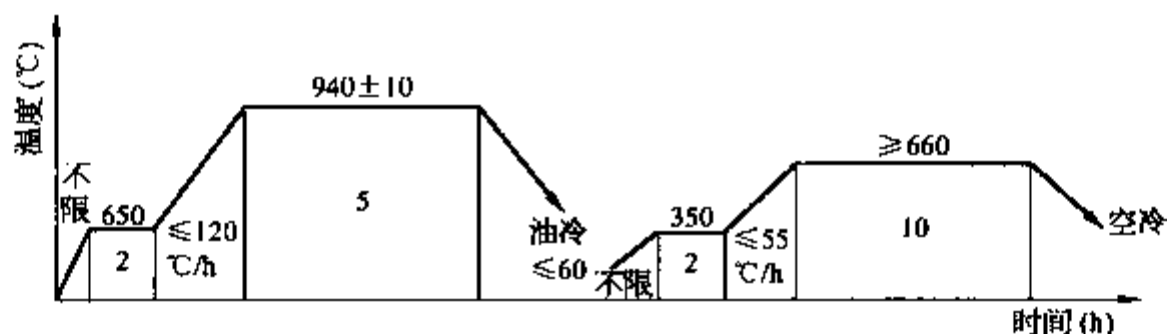


图 7-62 调质处理工艺曲线

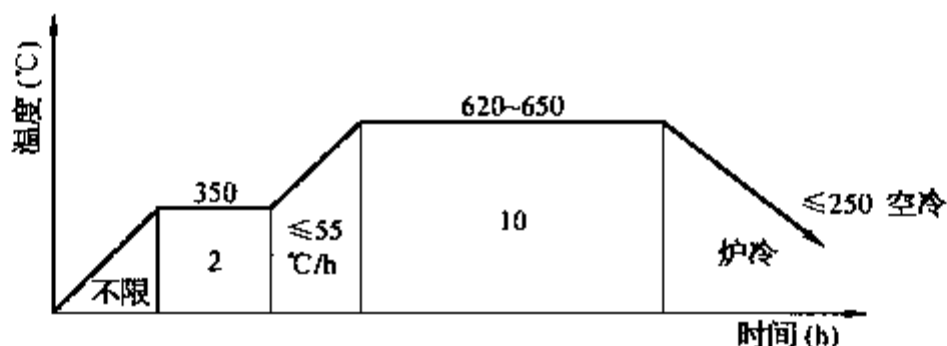


图 7-63 去应力处理工艺曲线

表 7-53 高温螺栓性能的要求

$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$A_5$ (%)	$Z$ (%)	硬度 HB	$A_{kC}$ (J)
$\geq 686$	$\geq 785$	$\geq 15$	$\geq 50$	248~293	$\geq 47$

## 第四节 量、刃具热处理

### 一、量具热处理

量具的热处理要求：在保证高硬度与高耐磨性的前提下，使量具在长期使用中保持尺寸稳定。

#### (一) 游标卡尺尺身热处理

游标卡尺是测量长度的计量器具(图 7-64)，要求有较好的耐磨性、硬度及尺寸稳定性，还应具有足够的韧性。



图 7-64 卡尺尺身

#### 1. 尺身的材料及技术要求

材料：T8A 或 40Cr13。

硬度：测量面及距测量面 2 mm 处，T8A 材料 59~64 HRC、40Cr13 材料 53~58 HRC。

距测量面 2 mm 处以外尺身，硬度为 40~48 HRC。

弯曲度：平面与侧面 $\leq 0.1$  mm。

## 2. 热处理工艺

1) 热处理工艺流程 淬火—清洗—装夹具压平回火—卡爪测量面高频感应局部淬火(先淬大爪,淬后清洗,再淬小爪)—回火—清洗—校直—稳定化处理—清洗—卡尺槽喷砂—防锈。

### 2) 热处理工艺规范

(1) 预备热处理。T8A 材料调质工艺为 760~780℃ 加热, 淬油冷却, 680~700℃ 回火。回火结束炉冷至 ≤ 500℃ 出炉空冷。

(2) 最终热处理工艺参数见表 7-54。

表 7-54 游标卡尺尺身热处理工艺规范

材料	预热 (盐浴)	加热 (盐浴)	冷却	回 火	高频感应淬火		回 火	稳定化 处理
					淬 大 爪	淬 小 爪		
T8A	650~ 700℃ 6 min	800~ 810℃ 6 min	150~ 170℃ 硝盐分级 后空冷	装专用夹具压 直后 380~420℃ 电炉回火 4~6 h	加热至 860~ 900℃, 150~170℃ 硝盐冷却、清洗	加热至 860~ 900℃, 150~170℃ 硝盐冷却	150~ 170℃ 2 h	150~ 170℃ 6~8 h
40Cr13	650~ 700℃ 9 min	900~ 910℃ 9 min	150~ 170℃ 硝盐分级 后空冷	装专用夹具压 直后 250~300℃ 电炉回火 4~6 h	加热至 1 100~ 1 130℃, 150~170℃ 硝盐冷却、清洗	加热至 1 100~ 1 300℃, 150~170℃ 硝盐冷却	150~ 170℃ 2 h	150~ 170℃ 6~8 h

热处理过程中, 卡尺尺身需采用夹具垂直悬挂淬火以减少淬火畸变。回火时应装夹具压紧回火, 回火后检查变形, 超差者用冷压法校直, 校后仍应装夹具压平压紧补充回火一次。高频感应加热淬火时应防止卡爪过热。

### (二) 游标卡尺尺框热处理

#### 1. 尺框的材料与技术要求

材料: T8A 或 40Cr13, 技术要求同卡尺尺身, 形状见图 7-65。

#### 2. 热处理工艺

1) 热处理工艺流程 大卡爪测量面局部高频感应淬火—清洗—小卡爪测量面局部高频感应淬火—回火—清洗—稳定化处理—清洗—防锈。

2) 尺框热处理工艺参数 见表 7-55。

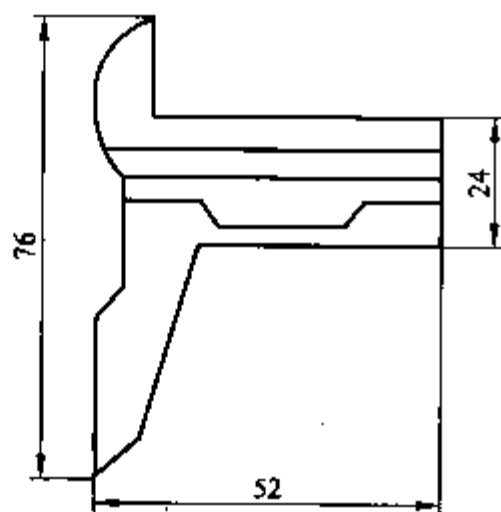


图 7-65 游标卡尺尺框

表 7-55 游标卡尺尺框热处理工艺规范

材料	预热 (盐浴)	加热 (盐浴)	冷却	回 火	高频感应淬火		回 火	稳定化 处理
					淬 大 爪	淬 小 爪		
T8A	650~ 700℃ 6 min	800~ 810℃ 6 min	150~170℃ 硝盐分级 后空冷	380~ 420℃ 4~6 h	860~900℃ 加热 150~170℃ 硝盐冷却、清洗	860~900℃ 加热 150~170℃ 硝盐冷却	150~ 170℃ 2 h	150~ 170℃ 6~8 h
40Cr13	650~ 700℃ 9 min	900~ 910℃ 9 min	150~170℃ 硝盐分级 后空冷	250~ 300℃ 4~6 h	1 100~1 130℃ 加热 150~170℃ 硝盐冷却、清洗	1 100~1 300℃ 加热 150~170℃ 硝盐冷却	150~ 170℃ 2 h	150~ 170℃ 6~8 h

### (三) 标准硬度块热处理

#### 1. 9SiCr 钢洛氏二级标准硬度块的材料与技术要求

9SiCr 钢原材料必须经过锻造和球化退火, 原材料碳化物不均匀度 ≤ 1 级, 珠光体球化级别 3 级。在不同的硬度等级中达到均匀一致的硬度, 整块中硬度差别在 1 HRC 以内。

## 2. 热处理工艺

规格  $\phi 60 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ , 内孔  $\phi 10 \text{ mm}$  的硬度块热处理工艺曲线见图 7-66。为消除磨削应力和加工硬化作用, 进行去应力处理, 工艺曲线见图 7-67。合格的硬度块送计量局进行鉴定。

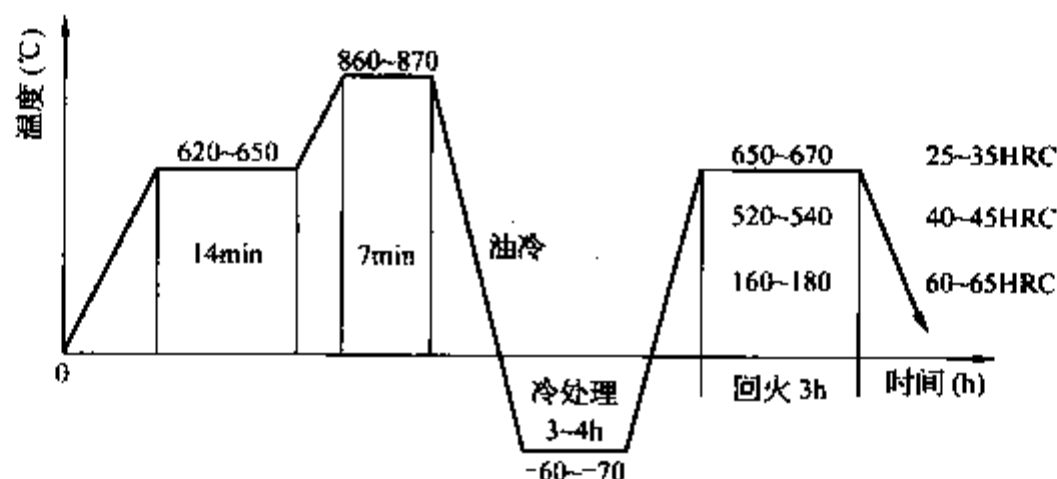


图 7-66 硬度块热处理工艺曲线

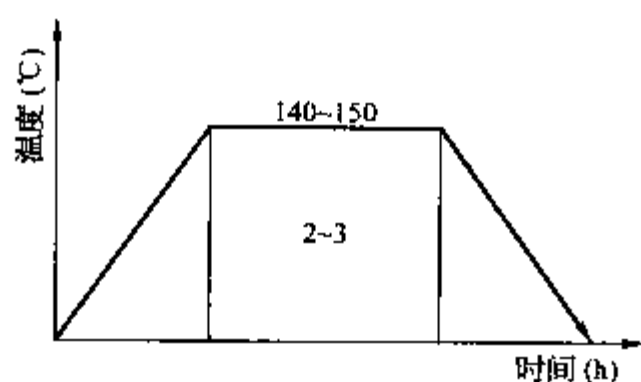


图 7-67 硬度块磨平面后消除应力工艺曲线

## 二、刀具热处理

刃(刀)具通过热处理, 可获得高的硬度和耐磨性, 满足锋利、经久的切削加工性要求, 同时又保持足够的韧性, 防止刃具使用中崩刃和脆断。另外, 有些刃具还要求一定的红硬性。刃具的热处理复杂多变, 对使用寿命的影响极大。

### (一) 直柄麻花钻热处理

直柄麻花钻是钻削刀具, 在钻削过程中刃尖与被切削材料发生强烈摩擦, 承受挤压应力、弯曲应力、冲击力及切削产生的高温, 要求麻花钻具有高硬度、高强度、高红硬性、高耐磨性与

一定的韧性。根据直柄钻的螺旋槽成型方法的不同, 直柄麻花钻可分为铣制钻、轧制钻、磨槽钻三种。

#### 1. 轧制直柄麻花钻的材料与技术要求

制造直柄麻花钻的材料, 可按用户需要, 分别选择通用高速钢、高性能高速钢和经济高速钢。刃部硬度要求为: 直径  $\phi 3 \sim 13 \text{ mm}$ , 硬度 63~66 HRC; 柄部硬度要求为: 直径  $\phi 3 \sim 13 \text{ mm}$ , 硬度 30~45 HRC。

#### 2. 热处理工艺流程

装卡—预热—加热—冷却—金相检查—清洗—喷砂—校直—回火—清洗—金相及硬度检查—喷砂—防锈—精磨—表面处理。热处理工艺参数见表 7-56。

表 7-56 直柄麻花钻盐浴热处理工艺规范

材 料	预 热		加 热		冷 却 温 度 (°C)	淬 火 晶 粒 度	回 火			
	温 度 (°C)	速 度 (s/mm)	温 度 (°C)	速 度 (s/mm)			温 度 (°C)	时 间 (h)	次 数	回 火 级 别
W6Mo5Cr4V2	820~860	30~40	1 215~1 230	15~20	580~620 分级后空冷	9.5~11	540~560	1~1.5	3	1~2
W9Mo3Cr4V	820~860	30~40	1 215~1 235	15~20	580~620 分级后空冷	9~10.5	540~560	1~1.5	3	1~2
W8Mo2Cr4V2Na1	820~860	30~40	1 220~1 235	15~20	580~620 分级后空冷	9.5~11	540~560	1~1.5	3	1~2
W2Mo9Cr4VCo8	820~860	30~40	1 170~1 185	15~20	580~620 分级后空冷	9.5~11	540~560	1~1.5	3~4	1~2
W4Mo3Cr4V	820~860	30~40	1 175~1 185	15~20	580~620 分级后空冷	9~10.5	540~560	1~1.5	3	1~2

### 3. 直柄麻花钻的表面处理

1) 蒸汽处理 蒸汽处理即将高速钢成品钻头置于蒸汽处理炉中加热氧化,当温度达到 540~570℃时,过热蒸汽与钢铁反应,表面生成一层均匀、多孔而致密的蓝色  $Fe_3O_4$  薄膜。薄膜层厚约 3~4  $\mu m$ ,能储油、防锈、降低刀具切削时的摩擦因数,并能提高钻头切削寿命约 20%~30%。

(1) 蒸汽处理的技术要求: 蒸汽处理后外观表面呈均匀美观的蓝灰色,无明显花斑及锈迹。

膜层致密度: 用 5% 中性硫酸铜溶液滴在去油后钻头的光滑表面,15 min 内不显示铜色,粗糙表面及边缘棱角处 5 min 内不显示铜色。

(2) 蒸汽处理工艺流程: 准备—去油清洗—酸洗—流动清水漂洗—清洁沸水清洗—蒸馏水清洗(温度 100℃)—蒸汽处理(一次或二次)—上油。蒸汽处理工艺曲线见图 7-68 和图 7-69。

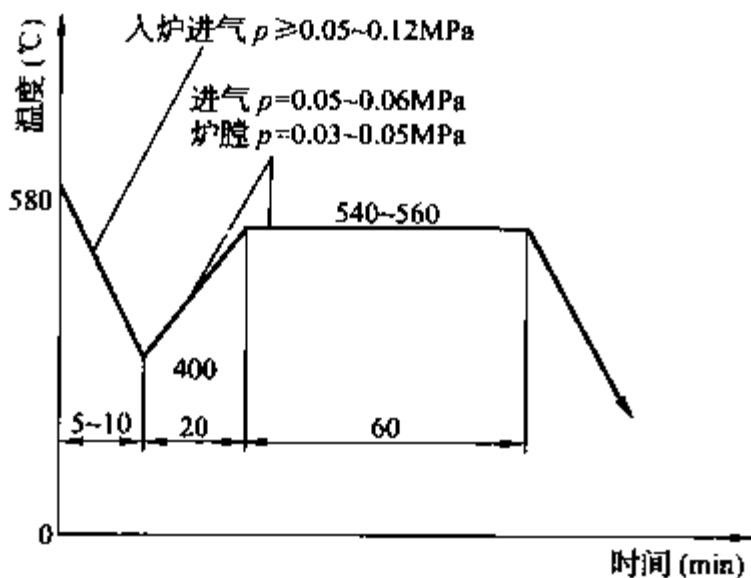


图 7-68 第一次蒸汽处理工艺

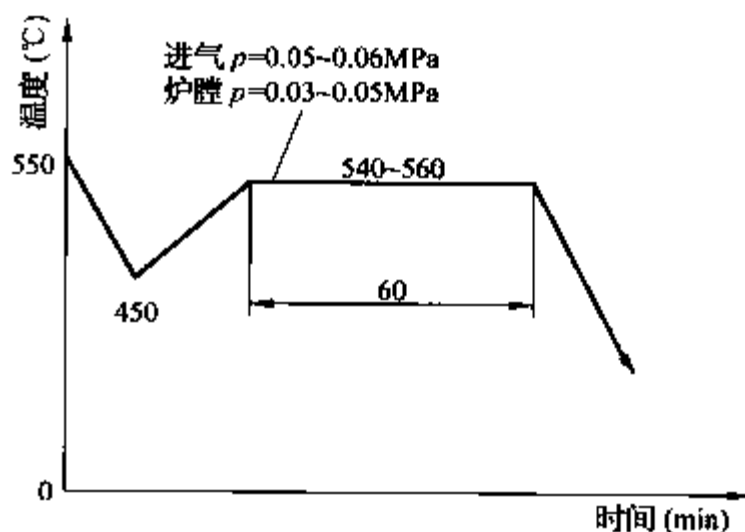


图 7-69 第二次蒸汽处理工艺

第一次蒸汽处理入炉温度适当提高至 580℃以减少炉温下降,同时提高蒸汽压力,迅速将水分吹干并排除炉内空气。还可减慢氧化膜形成速度,减少钻头表面出现的花斑。升温 and 保温阶段蒸汽压力适当降低,可以加快升温速度和保持温度恒定,并促进氧化膜的形成。

第二次蒸汽处理目的是加深蒸汽膜厚度,使表面颜色均匀一致,并使钻头回火更充分。

2) 低压氧氮化处理 低压氧氮化是将直柄钻置于负压的氧氮化炉中,升温至 540~560℃,通入氨气,氨受热分解出氮原子,部分被直柄钻吸收或与铁及合金元素形成化合物。再通入少量空气并进行氮原子的扩散,反复几次后再通入氨气与空气的混合气使之氧化并渗氮。

(1) 直柄钻低压氧氮化的技术要求: 经低压氧氮化处理后,外观表面呈均匀美观的蓝灰色,无明显花斑及锈迹。渗层: 15~40  $\mu m$ ; 硬度: 950~1 100 HV; 表面抗蚀性要求同蒸汽处理。

(2) 低压氧氮化工艺流程: 除油—漂洗—酸洗—水洗—沸水煮洗—沸腾蒸馏水—入蒸汽炉吹干—入氧氮化炉—低真空升温保温—渗氮—氧氮化。低压氧氮化工艺曲线见图 7-70。

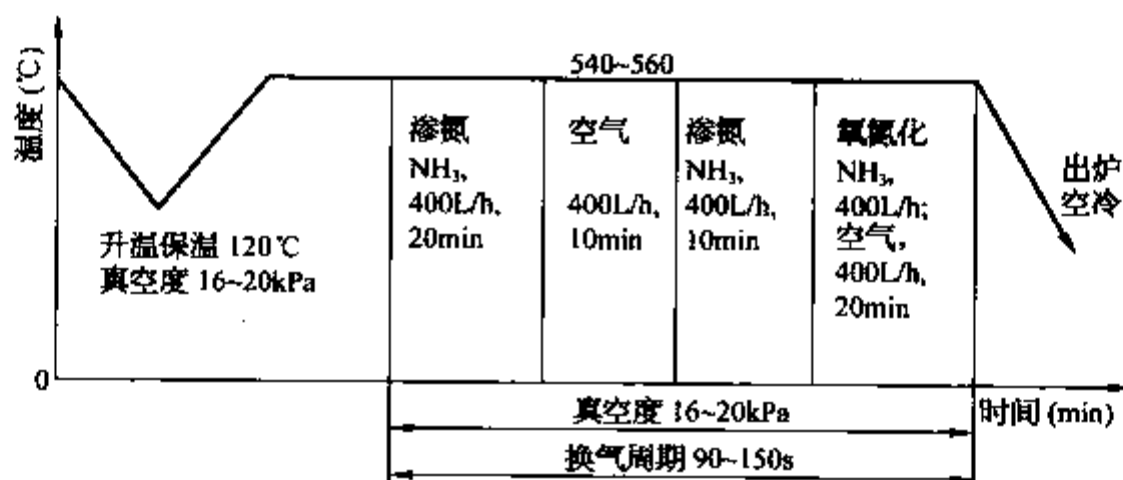


图 7-70 低压氧氮化工艺

(3) 滴注式氮化工艺流程: 除油—漂洗—酸洗—水洗—沸水洗—沸腾蒸馏水漂洗—入氮化炉—排气—氮共渗—扩散—出炉油冷。滴注式氮化工艺曲线见图 7-71。

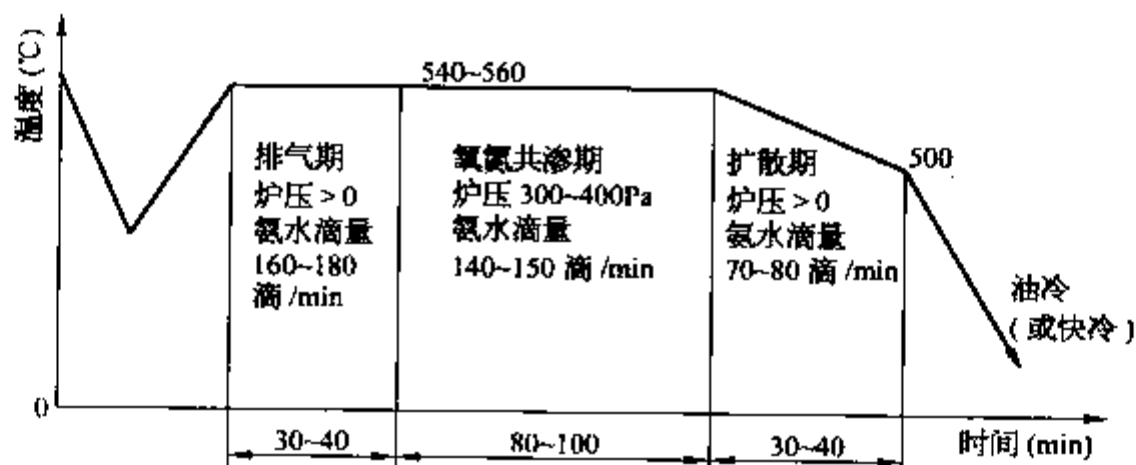


图 7-71 滴注式氮化工艺

## (二) 锥柄麻花钻热处理

锥柄麻花钻刃部钻头为高速钢,柄部采用结构钢(45 钢或 40Cr 钢),两种材料通过摩擦焊或电弧焊焊接而成,焊缝一般在柄—刃交界处靠近柄部一侧。

锥柄麻花钻柄和刃部的硬度不同,只能分别采用局部淬火方法达到,钻头的热处理只能在盐浴炉中进行。钻头类工具(包括立铣刀、拉刀等杆状刀具)至今无法采用真空淬火,成为目前工具行业以真空炉取代盐浴炉进行热处理技术改造的最大障碍。

锥柄麻花钻刃部要求高硬度、高强度、高红硬性、高耐磨性和较强的韧性,其失效形式以崩刃、磨损为主,通常用高速钢材料制作。

### 1. 锥柄麻花钻的技术条件

刃部硬度要求为 63~66 HRC;柄部硬度要求为 30~45 HRC(扁尾至锥柄长度 1/3 范围)。锥柄钻的径向偏摆见表 7-57。

表 7-57 锥柄麻花钻的偏摆要求

规格 部位 \ 偏摆		(mm)			
		φ10~15.5	φ15.6~23.5	φ23.6~32.5	φ32.6~49.5
刃部		0.16	0.20	0.22	0.24
柄部		0.17	0.20	0.23	0.25

### 2. 锥柄麻花钻热处理工艺

工艺流程: 装卡—预热—加热—冷却—检查—清洗—回火—清洗—柄部热处理—检查—校直—喷砂—外观检查—防锈。刃部热处理工艺参数见表 7-58;柄部热处理工艺参数见表 7-59。

表 7-58 锥柄钻刃部热处理工艺规范(盐浴热处理)

材 料	预热温度(°C) 预热时间 (s/mm)	加热温度(°C) 加热时间 (s/mm)	冷却温度(°C) 冷却时间 (s/mm)	淬火 晶粒度	回 火		
					回火温度(°C) 保温时间(h)	次数	回火 级别
W6Mo5Cr4V2	850±10 18~30	1 220~1 235 9~15	580~620 9~15	9~10.5	540~560 1.5	3	1~2
W9Mo3Cr4V	850±10 18~30	1 220~1 235 9~15	580~620 9~15	9~10.5	540~560 1.5	3	1~2
W8Mo2Cr4V2Na1	850±100 18~30	1 220~1 235 9~15	580~620 9~15	9~10.5	540~560 1.5	3	1~2

(续表)

材 料	预热温度(°C) 预热时间 (s/mm)	加热温度(°C) 加热时间 (s/mm)	冷却温度(°C) 冷却时间 (s/mm)	淬火 晶粒度	回 火		
					回火温度(°C) 保温时间(h)	次数	回火 级别
W2Mo9Cr4VCo8	850±10 18~30	1 170~1 185 9~15	580~620 9~15	9.5~10.5	540~560 2.5	3~4	1~2
W4Mo3Cr4V	850±10 18~30	1 175~1 185 9~15	580~620 9~15	9~10	540~560 1.5	3	1~2

表 7-59 锥柄钻头热处理工艺规范(盐浴热处理)

柄部材料	钻头规格/ 直径(mm)	加 热		冷 却		回 火	
		温度(°C)	时间(s)	介质	时间(s)	温度(°C)	时间(s)
45 钢	10~14	910~930	60~80	流动水 (≤60°C)	4~6	540~560	20~25
	14.25~23		80~100		6~8		30~35
	23.25~31.75		100~120		10~12		40~45
	31.8~50.50		120~140		12~15		50~60
40Cr 钢	10~14	910~930	90~100	油 (≤80°C)	40~60	540~560	20~25
	14.25~23		100~120		70~80		30~35
	23.25~31.75		120~150		90~120		40~45
	31.8~50.50		150~180		120~150		50~60

热处理过程中,刃部加热时间:小规格用上限,大规格用下限;刃部加热深度:钻头焊缝应高出盐浴面15~20 mm,如液面淹没焊缝,加热时焊缝处易发生开裂。40Cr 钢柄用油冷、45 钢柄用水冷(注意焊缝不能入水,以防淬裂)。

锥柄麻花钻的校直,一般在柄部热处理结束后进行,采用螺旋校直机或油压机对钻头柄部施压,使钻头的弯曲度达到技术要求(图 7-72)。如果钻头的弯曲度较大,可采用高频或氧乙炔火焰加热,使柄的槽根部约达 800°C 左右,然后对槽根部加压矫正。

### (三) 小钻头热处理

直径为  $\phi 0.25 \sim 3.0$  mm 的铣削或磨削小钻头热处理时易发生弯曲变形,切削时容易折断。要求在保证硬度和减少畸变量的同时,注重提高强度、韧性和耐磨性,采用真空气淬热处理可以满足性能要求。

1) 材料与技术要求 小钻头材料常用 W6Mo5Cr4V2、W9Mo3Cr4V、W2Mo9Cr4VCo8 等。刃部硬度要求为 63~66 HRC。

2) 小钻头的真空淬火工艺参数 见表 7-60。

小钻头真空气淬工艺说明:

真空淬火冷却压力为 0.4~0.6 MPa,高纯氮气冷却。850°C 以下真空炉升温速度为 5~10°C/min;850~1 050°C 升温速度为 10~15°C/min;1 050°C 至淬火加热温度,升温速度为 15~20°C/min。气淬时先快冷(风机转速 3 000 r/min)后慢冷(风机转速 1 500 r/min),炉温达 65°C 时零件出炉。

回火采用三角盒压紧后蒸汽处理回火。

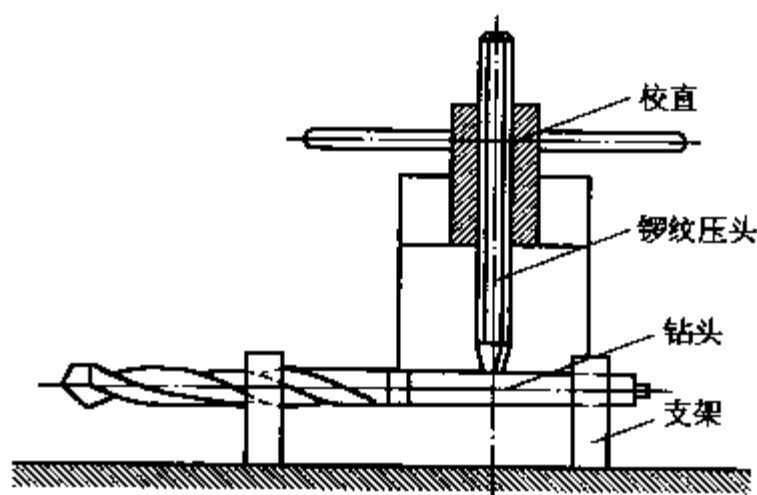


图 7-72 锥柄麻花钻校直示意图



表 7-60 小钻头真空淬火工艺规范

材 料	预 热				加 热		冷 却			回 火
	温度(°C) 时间 (min)	真空度 (Pa)	温度(°C) 时间 (min)	真空度 (分压) (Pa)	温度(°C) 时间(min)	真空度 (Pa)	氮气 压力 (MPa)	快冷 时间 (min)	慢冷 时间 (min)	温度(°C) 时间(h) ×次数
W6Mo5Cr4V2	850 50~60	1.33~ 13.3	1 050 40~50	66.7~ 133	1 215~1 225 30~35	66.7~ 133	0.4~ 0.6	10~ 15	15~ 20	540~550 3 h×3
W9Mo3Cr4V	850 50~60	1.33~ 13.3	1 050 40~50	66.7~ 133	1 215~1 225 30~35	66.7~ 133	0.4~ 0.6	10~ 15	15~ 20	540~550 3 h×3
W2Mo9Cr4VCo8	850 50~60	1.33~ 13.3	1 050 40~50	66.7~ 133	1 165~1 180 30~35	66.7~ 133	0.4~ 0.6	10~ 15	15~ 20	540~550 3 h×3

**(四) 机用丝锥热处理**

机用丝锥切削时主要承受挤压应力、摩擦力和扭矩,常见的失效形式为崩刃、磨损和折断,要求具有耐磨性、韧性和一定的硬度,但对红硬性的要求不高。机用丝锥常用高速钢材料制造,分整体高速钢丝锥和接柄丝锥。

## 1. 材料与条件

刃部材料: W6Mo5Cr4V2、W6Mo5Cr4V2Co5。

柄部材料: 整体丝锥柄一刃为同种材料;接柄丝锥柄部为 45 钢或 40Cr 钢。

刃部硬度要求: M3~M8, 62~65 HRC; >M8, 63~66 HRC。

柄部硬度要求: ≤M12, 30~52 HRC; >M12, 30~45 HRC。

## 2. 机用丝锥的热处理工艺

工艺流程: 预热—加热—冷却—清洗—回火—清洗—柄部处理—清洗—回火—清洗—检查—喷砂—外观检查。机用丝锥热处理工艺规范见表 7-61 和表 7-62。

表 7-61 机用丝锥热处理工艺规范

材 料	规 格	预 热		加 热	冷 却	回 火
		箱式炉	盐浴炉			
W6Mo5Cr4V2	M3~M8		820~860°C 30~40 s/mm	1 180~1 190°C 15~20 s/mm	580~620°C 时间同加热	540~550°C 1 h×3 次
	>M8~M60		820~860°C 20~24 s/mm	1 215~1 230°C 10~12 s/mm	580~620°C 时间同加热	540~560°C 1 h×3 次
	>M60~M80	500~520°C 1.5 min/mm	820~860°C 14~16 s/mm	1 215~1 225°C 7~8 s/mm	580~620°C 400~450°C 时间同加热	540~560°C 1 h×3 次
	>M80	500~520°C 1.5 min/mm	820~860°C 12~14 s/mm	1 215~1 225°C 6~7 s/mm	二段分级后 240~280°C 等温 90 min	540~560°C 1 h×4 次
W2Mo9Cr4V2 (M7)	M3~M8		820~860°C 30~40 s/mm	1 170~1 190°C 15~20 s/mm	580~620°C 时间同加热	540~560°C 1 h×3 次
	>M8~M60		820~860°C 20~24 s/mm	1 190~1 210°C 10~12 s/mm	580~620°C 时间同加热	540~560°C 1 h×3 次
	>M60~M80	500~520°C 1.5 min/mm	820~860°C 14~16 s/mm	1 190~1 210°C 7~8 s/mm	580~620°C 400~450°C 时间同加热	540~560°C 1 h×3 次
	>M80	500~520°C 1.5 min/mm	820~860°C 12~14 s/mm	1 190~1 210°C 6~7 s/mm	二段分级后 240~280°C 等温 90 min	540~560°C 1 h×4 次

(续表)

材 料	规 格	预 热		加 热	冷 却	回 火
		箱式炉	盐浴炉			
W6Mo5Cr4V2Co5 (M35)	M3~M8		820~860℃ 30~40 s/mm	1 180~1 220℃ 15~20 s/mm	580~620℃ 时间同加热	540~560℃ 1 h×3 次
	>M8~M60		820~860℃ 20~24 s/mm	1 190~1 230℃ 10~12 s/mm	580~620℃ 时间同加热	540~560℃ 1 h×3 次
	>M60~M80	500~520℃ 1.5 min/mm	820~860℃ 14~16 s/mm	1 190~1 230℃ 7~8 s/mm	580~620℃ 400~450℃ 时间同加热	540~560℃ 1 h×3 次
	>M80	500~520℃ 1.5 min/mm	820~860℃ 12~14 s/mm	1 190~1 230℃ 6~7 s/mm	二段分级后 240~280℃ 等温 90 min	540~560℃ 1 h×4 次

表 7-62 丝锥柄部处理工艺规范

柄部材料	处理 方式	规 格	加 热		冷 却		回 火	
			温度(℃)	时间(s/mm)	介 质	时 间	温度(℃)	时 间
高速钢	退柄	M3~M10	840~860	20~40	空冷	冷至室温	540~550	1 h
	退柄	M12~M22	840~860	12~20	空冷	冷至室温	540~550	1 h
	淬柄	>M22	860~890	12~20	240~400℃ 硝盐	12~20 s/mm	380~400	1 h
45 钢	淬柄	M14~M20	890~900	8	150~180℃ 硝盐	120~150 s	400	1 h
	淬柄	≥M22	890~900	6~7	先水冷 后 150~180℃ 硝盐	0.4 s/mm 12~20 s/mm	590±5	1~1.2 s/mm
40Cr 钢	淬柄	≥M14	920~930	7~8	≤80℃油	0.3~0.4 s/mm	380~400	30~45 min

机用丝锥热处理工艺说明:

(1) 丝锥淬火加热温度一般低于正常淬火加热温度, M3~M8 规格采用低温淬火工艺, 以提高韧性。大规格丝锥采用下限加热系数, 小规格采用上限加热系数。

(2) >M60 规格丝锥采用二段分级淬火(580~620℃及 400~450℃), 分级时间与淬火加热时间相同。

(3) >M80 规格丝锥除二段分级淬火冷却外还需等温淬火, 等温温度 240~280℃, 等温时间 60~90 min。

(4) ≤M12 丝锥淬火后先柄部退火后回火。

(5) ≤M22 整体高速钢丝锥采用整体淬火再柄部退火, 使柄部硬度达到技术要求。>M22 的丝锥先淬刃部, 后淬柄部。

(6) M14~M20 的接柄丝锥柄部加热后淬 150~180℃硝盐; ≥M22 的接柄丝锥柄部加热后淬水入硝(150~180℃硝盐浴), 并采用快速回火工艺。

### (五) 齿轮滚刀热处理

通常用高速钢制造的滚刀, 其切削速度在 20~40 m/min 范围内。切削过程中受到较大摩擦力和一定的冲击力, 其失效形式为磨损、崩刃和掉齿; 要求齿轮滚刀具有高硬度、高耐磨性、高强度及较好的红硬性和韧性, 并有较高的尺寸稳定性。

#### 1. 技术要求

齿轮滚刀的硬度要求为 64~66 HRC。

碳化物不均匀度：模数=1~5 mm(直径 $\leq\phi 100$  mm) $\leq 4$ 级，模数 $>5$  mm(直径 $>\phi 100$  mm) $\leq 5$ 级。

## 2. 热处理工艺

工艺流程：预热—加热—冷却—回火—时效处理—清洗—检查—喷砂—外观检查—上油防锈。热处理工艺规范见表7-63。

表7-63 齿轮滚刀盐浴热处理工艺规范

材 料	规格 (模数)	预 热		加 热	冷 却 制 度			回 火	时 效
		箱式炉	盐浴炉		一段分级	二段分级	等 温		
W6Mo5Cr4V2	$<5$		820~860℃ 24~28 s/mm	1 220~ 1 235℃ 12~14 s/mm	580~620℃ 6~8 s/mm			540~560℃ 1 h×3次	
	$\geq 5$	500~520℃ 1.5 min/mm	820~860℃ 18~20 s/mm	1 215~ 1 230℃ 9~10 s/mm	580~620℃ 4~6 s/mm	400~450℃ 9~10 s/mm	240~280℃ 60~90 min	540~560℃ 1 h×4次	370~ 380℃ 6~8 h
W9Mo3Cr4V	$<5$		820~860℃ 24~28 s/mm	1 220~ 1 235℃ 12~14 s/mm	580~620℃ 6~8 s/mm			540~560℃ 1 h×3次	
	$\geq 5$	500~520℃ 1.5 min/mm	820~860℃ 18~20 s/mm	1 215~ 1 230℃ 9~10 s/mm	580~620℃ 4~6 s/mm	400~450℃ 9~10 s/mm	240~280℃ 60~90 min	540~560℃ 1 h×4次	370~ 380℃ 6~8 h
W10Mo- 4Cr4V3Al (5F6)	$<5$		820~860℃ 24~28 s/mm	1 230~ 1 245℃ 12~14 s/mm	580~620℃ 6~8 s/mm			540~560℃ 1 h×3次	
	$>5$	500~520℃ 1.5 min/mm	820~860℃ 18~20 s/mm	1 225~ 1 240℃ 9~10 s/mm	580~620℃ 4~6 s/mm	400~450℃ 9~10 s/mm	240~280℃ 60~90 min	540~560℃ 1 h×4次	370~ 380℃ 6~8 h

大规格滚刀为防止淬火开裂，除合理选材外，热处理时采用多段预热、取工艺温度下限加热、二段分级淬火+等温处理，及时回火及回火前增加预热、回火后缓冷等措施。

对尺寸精度要求高的滚刀，应采用分级等温淬火、四次回火及稳定化处理等措施，必要时在第一次或第二次回火后增加一次冷处理(-70~-80℃保温4~6 h)。这些措施可减少淬火畸变，防止内孔尺寸涨大，保持滚刀尺寸的稳定性。

### (六) 高速切削滚刀热处理

高速切削滚刀的滚切速度超过60 m/min，在切削时产生高速切削摩擦，形成热力耦合不均匀应力场，并使被切工件表面产生高应变率的切削变形；其失效形式主要是崩刃，在热力耦合不均匀强应力作用下，引起裂纹扩展，造成后期疲劳破损及热—力学磨损、热—化学磨损；要求高速切削滚刀刀体材料具有高硬度、高红硬性，齿部表面涂层后具有较高的抗氧化温度(800~1 100℃)、高的表面硬度( $\geq 2 000$  HV)及好的耐磨性。

#### 1. 材料与技术要求

常用刀具材料有：

高性能高速钢，如 M35(W6Mo5Cr4V2Co5)、M42(W2Mo9Cr4VCo8)；

粉末冶金高速钢，如 S390(W10Mo2Cr5V5Co8)、ASP2030(W6Mo5Cr4V3Co8)、ASP2052(W10Mo2Cr5V5Co8)、ASP2060(W6Mo7Cr4V6Co10)；

硬质合金，切削速度达100~150 m/min的滚刀采用细晶粒(粒度0.6~0.8  $\mu\text{m}$ )或超细晶粒(粒度0.2~0.5  $\mu\text{m}$ )的硬质合金，如 WC 基硬质合金、TiCN 基硬质合金。

刀体硬度要求为65~68 HRC；表面涂层厚度2~4  $\mu\text{m}$ ，表面硬度 $\geq 2 000$  HV。

#### 2. 高速切削滚刀的热处理工艺

工艺流程：预热—加热—冷却—回火—时效处理—清洗—检查—喷砂—外观检查—上油防锈—精加工—涂层。热处理工艺参数见表7-64。

表 7-64 高速切削滚刀热处理工艺规范

材 料	规格 (模数)	预 热		加 热	冷 却 制 度			回 火	时 效
		箱式炉	盐浴炉		一段分级	二段分级	等 温		
M35 (W6Mo5Cr4V2Co5)	<5		820~860℃ 18~24 s/mm	1 210~1 230℃ 10~12 s/mm	—	—	—	540~550℃ 1.5 h×3 次	—
	≥5	500~550℃ 1.5 min/mm	820~860℃ 18~24 s/mm	1 190~1 220℃ 10~12 s/mm	400~450℃ 10~12 s/mm	240~280℃ 60~90 min	—	540~550℃ 1.5 h×4 次	370~380℃ 6~8 h
M42 (W2Mo9Cr4VCo8)	<5		820~860℃ 18~24 s/mm	1 170~1 190℃ 10~12 s/mm	—	—	—	540~550℃ 1.5 h×3 次	—
	≥5	500~520℃ 1.5 min/mm	820~860℃ 18~24 s/mm	1 170~1 180℃ 10~12 s/mm	—	240~280℃ 60~90 min	—	—	370~380℃ 6~8 h
S390 (W10Mo2Cr5V5Co8)	<5		820~860℃ 18~24 s/mm	1 170~1 230℃ 10~12 s/mm	580~620℃ 5~6 s/mm			—	—
	≥5	500~520℃ 1.5 min/mm	820~860℃ 18~20 s/mm	1 160~1 225℃ 9~10 s/mm				—	—
S590 (W6Mo5Cr4V3Co8)	<5		820~860℃ 18~24 s/mm	1 140~1 180℃ 10~12 s/mm	400~450℃ 10~12 s/mm			—	—
	≥5	500~520℃ 1.5 min/mm	820~860℃ 18~20 s/mm	1 130~1 175℃ 9~10 s/mm				—	—
ASP2060 (W6Mo7Cr4V6Co10)	<5		820~860℃ 18~24 s/mm	1 100~1 180℃ 10~12 s/mm	—			—	—
	≥5	500~520℃ 1.5 min/mm	820~860℃ 18~20 s/mm	1 070~1 170℃ 9~10 s/mm				—	—

M42 钢高速切削滚刀经热处理淬火虽可得到较高的硬度,但韧性不足,因此通常采用等温冷却。粉末冶金高速钢淬火加热时间以 9~10 s/mm 为宜,加热时间过长将对钢的综合性能产生不良影响。高速切削滚刀如大模数滚刀,推荐采用高压气淬真空热处理,将会获得更良好的效果。

### 3. 高速切削滚刀表面涂层

涂层不但能提高齿轮滚刀的表面硬度( $\geq 2000$  HV)、增加刀具的耐磨性,而且能提高刀具的抗氧化温度( $\geq 800^\circ\text{C}$ )、降低摩擦因数,为刀具提供自润滑和降低切削热,使刀具适用于高速、高温及硬切削,大大提高了刀具的切削寿命。

1) 高速切削刀具的涂层技术 高速切削刀具的涂层技术主要有两种,一种是 CVD(化学气相沉积)和 MTCVD(中温 CVD),另一种是 PVD(物理气相沉积)。

CVD 工艺温度较高( $1000\sim 1100^\circ\text{C}$ ),适用于抗高温材料制造的刀具涂覆 TiC、TiCN、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层。

MTCVD 适用于硬质合金刀具的涂层,沉积厚度可达  $20\ \mu\text{m}$ ,常用于高磨蚀性工件的高速切削。

PVD 工艺温度较低,仅为  $180\sim 480^\circ\text{C}$ ,可适用于高速钢、粉末冶金和硬质合金材料的涂层。高速切削滚刀一般都采用 PVD 涂层。

2) 涂层的工艺过程 预处理及清洗—装炉—工艺输入—抽真空—加热—氩离子刻蚀—沉积涂层—冷却—出炉检测。TiN 涂层工艺参数(PL1000 型涂膜机)见表 7-65。

表 7-65 TiN 涂层工艺参数

偏压(V)	弧电流(A)	Ar 流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	$\text{N}_2$ 流量( $\text{cm}^3/\text{s}$ )	真空度(Pa)
100~1200	170~180	20~400	60~240	$1\times 10^{-4}$
沉积时间(min)	涂层温度( $^\circ\text{C}$ )	膜层厚度( $\mu\text{m}$ )	硬度 HV	结合力(N)
90~120	$\leq 440$	2~3	2000~2400	$\geq 45$

3) 涂层品种和质量参数 见表 7-66。

表 7-66 涂层品种和质量参数

涂层品种	TiN	TiCN	TiAlN	AlTiN	AlCrN	TiCN-MP <sup>①</sup>	CBC(DLC) <sup>②</sup>
硬度 HV	2000~2400	3500~3700	3000~3500	3500~3800	3200	2800~3200	1800~2000
抗氧化温度( $^\circ\text{C}$ )	600	400	800	800	1100	400	400
结合力(N)	$\geq 45$	$\geq 45$	$\geq 45$	$\geq 45$	$\geq 45$	$\geq 45$	$\geq 45$
摩擦因数	0.55	0.2	0.5	0.7	—	0.2	0.15

注:① MP——多功能涂层。

② CBC(DLC)——CBC 为以 Cr 金属元素打底的碳基润滑涂层;DLC 为类金刚石涂层。

## (七) 剃齿刀热处理

剃齿刀是齿轮的精切加工刀具,精度要求较高,切削中主要承受摩擦和冲击力,要求具有耐磨性和良好的强度—韧性配合以及尺寸稳定性;其失效形式通常为磨损、崩刃;一般采用高速钢材料制造。

### 1. 技术要求

剃齿刀的硬度要求为 64~66 HRC(高速钢)、65~67 HRC(含钴高速钢);碳化物不均匀度: $\leq 4$  级。

### 2. 热处理工艺

工艺流程:第一段预热—第二段预热—加热—冷却—回火—冷处理—回火—稳定化处理—检查。  
 $\phi 240$  mm 剃齿刀热处理工艺参数见表 7-67。

表 7-67  $\phi 240$  mm 剃齿刀热处理工艺规范

材 料	预 热		加 热 ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	冷却停留时间(min)			冷处理 $-70\sim-80^{\circ}\text{C}$	回火 ( $^{\circ}\text{C}$ )	稳定化 处理( $^{\circ}\text{C}$ )
	500~ 520 $^{\circ}\text{C}$	820~ 860 $^{\circ}\text{C}$		580~ 620 $^{\circ}\text{C}$	400~ 450 $^{\circ}\text{C}$	240~ 280 $^{\circ}\text{C}$			
W6Mo5Cr4V2	1.5 min/mm	11 min	1 220~1 230 5.5	3	5.5	90~120	4~6 h	540~550 1 h $\times$ 3 次	370~380 6~8 h
W6Mo5Cr4V3Co5	1.5 min/mm	11 min	1 190~1 225 5.5	3	5.5	90~120	4~6 h	540~550 1 h $\times$ 3 次	370~380 6~8 h
W2Mo9Cr4VCo8	1.5 min/mm	11 min	1 170~1 180 5.5	3	5.5	90~120	4~6 h	540~550 1 h $\times$ 3 次	370~380 6~8 h

### (八) 拉刀热处理

拉刀是切削进给量小、低速及连续切削的孔加工工具；拉削过程中轴向受很大拉力，齿部受较大的摩擦力；失效形式为磨损、崩刃和折断；要求具有较高的耐磨性与较高的强度及韧性的配合。

#### 1. 技术要求

拉刀由通用高速钢或高性能高速钢制造，刃部硬度要求为 64~67 HRC，导向部分(前导、后导) $\geq 50$  HRC，柄部硬度要求为 40~52 HRC。

径向跳动要求(圆形拉刀)见表 7-68。直线度要求(平刀体键槽拉刀)见表 7-69。

原材料碳化物不均匀度要求：圆形拉刀见表 7-70，平刀体键槽拉刀见表 7-71。

表 7-68 径向圆跳动要求(圆形拉刀)

拉刀直径 (mm)	拉刀长度(mm)		
	<900	900~1 200	>1 200
	径向圆跳动量(mm)		
<50	0.25	0.35	0.35
50~90	0.30	0.35	0.40
>90	0.35	0.40	0.40

表 7-69 平刀体键槽拉刀直线度要求

拉刀规格 (mm)	直线度要求(mm)	
	拉刀长度 $\leq 900$	拉刀长度 $> 900$
键宽 $B \leq 12$	0.30	0.35
键宽 $B > 12$	0.40	0.45

表 7-70 圆形拉刀材料碳化物不均匀度要求

材料直径(mm)	碳化物不均匀度
$\leq 30$	$\leq 3$ 级
$> 30 \sim 40$	$\leq 4$ 级
$> 40 \sim 60$	$\leq 5$ 级
$> 60 \sim 80$	$\leq 6$ 级
$> 80 \sim 100$	$\leq 7$ 级

表 7-71 键槽拉刀材料碳化物不均匀度要求

材料直径(mm)	碳化物不均匀度
$\leq 40$	$\leq 3$ 级
$> 40 \sim 60$	$\leq 4$ 级
$> 60 \sim 80$	$\leq 5$ 级
$> 80 \sim 100$	$\leq 6$ 级

2. 拉刀盐浴热处理工艺

工艺流程：消除应力—预热—加热—冷却—热校直—回火—热焖校直—回火—热焖校直—回火—热焖校直—回火—热焖校直—清洗—柄部处理—清洗—检查弯曲和硬度—喷砂—上防锈油。圆形拉刀热处理工艺参数见表 7-72。拉刀柄部处理工艺参数见表 7-73。

表 7-72 圆形拉刀热处理工艺规范

材 料	拉刀直径 (mm)	预 热		加 热	冷 却 时 间			回 火
		井式炉 500~550℃	盐浴炉 800~860℃		分级 580~620℃	分级 400~500℃	等温 260~280℃	
W6Mo5Cr4V2	≤20	—	26~ 32 s/mm	1 220~1 230℃ 13~16 s/min	5~6 s/mm	—	20~25 min	1.5~2 h ×3次
	>20~50	≥40 mm 1.5~2 h	20~ 26 s/mm	1 220~1 230℃ 10~13 s/min	5~6 s/mm	—	20~25 min	1.5~2 h ×3次
	>50~90	1.5~2 h	18~ 20 s/mm	1 220~1 230℃ 9~10 s/min	4~5 s/mm	4~5 s/mm	25~30 min	1.5~2 h ×3次
	>90~150	1.5~2 h	16~ 18 s/mm	1 210~1 220℃ 8~9 s/min	4~5 s/mm	4~5 s/mm	30~40 min	1.5~2 h ×4次
W9Mo3Cr4V	≤20	—	26~ 32 s/mm	1 220~1 230℃ 13~16 s/min	5~6 s/mm	—	20~25 min	1.5~2 h ×3次
	>20~50	≥40 mm 1.5~2 h	20~ 26 s/mm	1 220~1 230℃ 10~13 s/min	5~6 s/mm	—	20~25 min	1.5~2 h ×3次
	>50~90	1.5~2 h	18~ 20 s/mm	1 220~1 230℃ 9~10 s/min	4~5 s/mm	4~5 s/mm	25~30 min	1.5~2 h ×3次
	>90~150	1.5~2 h	16~ 18 s/mm	1 210~1 220℃ 8~9 s/min	4~5 s/mm	4~5 s/mm	30~40 min	1.5~2 h ×4次
W2Mo9Cr4VCo8 (M42)	≤20	—	26~ 32 s/mm	1 170~1 185℃ 13~16 s/min	5~6 s/mm	—	20~25 min	1.5~2 h ×3次
	>20~50	≥40 mm 1.5~2 h	20~ 26 s/mm	1 170~1 185℃ 10~13 s/min	5~6 s/mm	—	20~25 min	1.5~2 h ×3次
	>50~90	1.5~2 h	18~ 20 s/mm	1 165~1 180℃ 9~10 s/min	4~5 s/mm	4~5 s/mm	25~30 min	1.5~2 h ×3次
	>90~150	1.5~2 h	16~ 18 s/mm	1 160~1 175℃ 8~9 s/min	4~5 s/mm	4~5 s/mm	30~40 min	1.5~2 h ×4次

表 7-73 拉刀柄部处理工艺规范

加热温度 (℃)	加热时间	冷 却		硬度(HRC)
		介 质	时 间	
900~930	12~20 s/mm	240~280℃硝盐	12~20 s/mm	40~52

### 3. 拉刀的校直

拉刀淬火畸变必须通过人工使用油压机或螺旋压力机校直。拉刀在热处理过程中的校直顺序和方法如下:

1) 淬火后的热压校直 将冷至 200℃左右的拉刀测量出弯曲位置及弯曲量,按弯曲长度与弯曲量的大小分段加压。温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$ 时压力可稍大些但时间可短一些;温度 $< 150^{\circ}\text{C}$ 时加压力量小些可时间长一些。将拉刀压至反方向弯曲,弯曲量是原弯曲量的 1/2~1/3。间隔一段时间(5~10 min)再重新测量并校直,反复数次直至拉刀表面温度低于 50℃停校。

对 S 形弯曲的拉刀,先将弯曲量小的部位压至反方向弯曲,使整根拉刀弯曲方向一致,然后再按全长弯曲量大小分段,给予不同压力的校正,间隔稍短时间再反复测量与校直。

2) 回火后的热校直 经校直过的拉刀回火后弯曲会恢复,故每次回火后拉刀必须校直。回火后的拉刀采用“静压”校直法,即将冷到 450℃左右的拉刀用螺旋压力机加压保持一段时间,使拉刀弯曲得到校直。一般第一次回火校直效果好,加压时间可适当短些,以后各次回火校直效果逐次减弱,加压时间要长些(冷至室温才卸去压力)。加压力量根据弯曲量确定。每次回火校直应将拉刀压成反方向弯曲,弯曲量为原方向弯曲量的 1/3。

3) 回火中的反向夹紧校直 此法是将已完成三次回火仍未达到弯曲要求的两根拉刀,凸面对凸面靠在一起,在最高点处中间置一垫铁,两端用铁丝扎紧,形成反向弹性弯曲,再入炉回火,使之产生热塑性变形达到校直目的。

4) 复校 回火后柄部处理结束的拉刀还要进行一次弯曲变形检查,超差者再做一次最终校直。校直方法有两种,一种是冷压柄部与前导向间未淬硬部位,有意将柄刃压成反方向弯曲,使拉刀全长范围达到弯曲公差。第二种是反击法校直,即用硬质合金凿子敲击拉刀凹面容屑槽底部,造成局部扩张使弯曲矫正。此法仅适用直径 $\leq \phi 60\text{ mm}$ 的拉刀及小规格键槽拉刀。反击后应低温消除应力并及时磨削加工,去除凿击痕迹。

### 4. 热处理工艺特别说明

拉刀热处理的关键是减少淬火畸变和防止开裂,具体措施为:

(1) 淬火前消除应力(温度 500~550℃,时间 2~3 h,随炉冷至室温)。

(2) 多段预热。采用正常工艺的下限温度淬火加热。

(3) 多段分级冷却。冷至 240~280℃等温 20~40 min。

(4) 对 $\geq \phi 80\text{ mm}$ 直径的拉刀,冷到 200℃以上时将下端(后导向部)浸入中温盐浴(浸入深度约 20 mm)局部缓慢加热至 800℃左右,以降低顶尖孔部位的应力,避免下端部中心孔处裂纹隐患。

(5) 一般拉刀冷却至室温后(2~4 h)应及时回火; $\geq \phi 80\text{ mm}$ 拉刀冷却至 100~150℃应立即回火。拉刀回火前应在 260~280℃硝盐炉中预热 30~60 min;规格大者预热时间增加,回火时炉温低于 500℃入炉;特大规格拉刀可二段预热(第二段 400~500℃),再升至规定回火温度。回火后空冷一段时间再进入 240~280℃硝盐炉等温 10~20 min。回火全部结束后,拉刀冷透才能清洗。

## 第五节 模具热处理

模具是制造业的重要工艺装备。模具材料和热处理是影响模具性能和使用寿命的关键,约 60%模具的早期失效是由于材料和热处理因素所造成。

### 一、模具的工作条件、性能要求及材料

模具按用途可分为塑料模具、冷作模具和热作模具三大类,各类模具的常用材料性能及用途见表 7-74~表 7-77。



表 7-74 各类模具的常用材料及要求

模具类型	模具的用途	对 模 具 的 要 求	常用材料
塑料模具	用于塑料制品的注射(注塑)、压缩(压塑)、挤压、压注和吹塑等成型。 塑料模具包括结构件浇注系统、导向板、定模板、顶出机构、支承件等,以及成型件型腔、型芯、嵌镶件等	一定的硬度(耐磨性)、强度和韧性等综合力学性能,有良好的耐蚀性和一定的耐热性,以及良好的切削加工性能、良好的尺寸稳定性等	见表 7-75
冷作模具	在常温下对材料进行压力加工或其他加工,包括冲裁模、挤压模、拉伸模、冷锻模、弯曲模、成型模、剪切模、滚丝模和拉丝模等	工作时要承受高的压力、弯曲力、冲击力,同时不断与坯料发生剧烈摩擦。主要的失效形式是磨损、脆断、弯曲、咬合、塌陷、啃伤、软化等。要求材料具有良好的冷热加工性能,通常要求硬度 58~64 HRC,保证模具不发生塑性变形。具有高的耐磨性,使模具在长期工作中保持尺寸精度。具有足够的强度和韧性,保证模具工作时在冲击负载、弯曲负载等作用下不易崩刃、断裂	见表 7-76
热作模具	用于在高温状态下进行压力加工使金属成型,如锤锻、模锻、热挤压、压铸等模具	在反复受热和冷却条件下工作,受到交变热应力、一定的工作压力和冲击载荷作用,主要失效形式有冷热疲劳失效(龟裂)、磨损、断裂、塑性变形、表面氧化腐蚀、粘模等。要求材料具有良好的导热性和冷热加工性能。 要求具有高温下能保持较高的力学性能,即在高温下有足够的强度、硬度、耐磨性和韧性等,良好的耐热疲劳性,较高的热稳定性和耐回火性。要求有较小的回火脆性倾向,较好的抗热磨损及抗氧化性能	见表 7-77

表 7-75 常用的塑料模具用钢

钢 类 别	钢 号	热 处 理 状 态	应 用 简 述
碳素塑料模具专用钢	SM45、SM48、SM50、SM53、SM55	调质或淬火	用于生产批量不大,精度、寿命要求不高的中、低档塑料模具。SM45~SM55 钢与 45~55 钢区别在于 $w_p$ 、 $w_s$ 低, $w_c$ 的波动范围窄,力学性能稳定
低碳结构钢	10、20、20Cr、12CrNi3、12Cr2Ni4、20Cr2Ni4、20CrMnTi、20CrMnMo、0Cr4NiMoV <sup>①</sup> (LJ)(冷挤压专用钢)	渗碳淬火	主要用于生产冷挤压成型的塑料模,可减少切削加工量,制模周期短、精度高,但热处理工艺较复杂、周期长,是制造中、小型至大、中型耐磨性高的塑料模具
中碳合金结构钢	40Cr、42CrMo、38CrMoAl	调质预硬化	用于生产中型至大、中型塑料模具,38CrMoAl 钢还可渗氮以提高抗蚀性、耐磨性
合金塑料模具专用钢	(SM)3Cr2Mo、(SM)3Cr2NiMnMo		应用广泛,可用来制造大、中型至特大型精密塑料模具
易切削塑料模具钢	5CrNiMnMoVSCa <sup>①</sup> (5NiSCa)、Y55CrNiMnMoVS <sup>①</sup> (SM1)、8Cr2MnWMoVS <sup>①</sup> (8Cr2S)、		切削加工性好,适宜制造精密塑料模具

(续表)

钢类别	钢号	热处理状态	应用简述
碳素工具钢 <sup>②</sup>	T7(A)、T8(A)、T9(A)、T10(A)、T12(A)	淬火 (一般成型后淬火)	可用来生产要求高硬度、耐磨性好的塑料模(如玻璃纤维作增强材料的塑料模具),或要求长寿命、需高镜面性的塑料模。但要修正热处理畸变,使成本增加,生产周期延长。
低合金冷作模具钢	9SiCr、9Mn2V、CrWMn、9CrWMn、7CrSiMnMoV <sup>①</sup> (CH-1)(火焰淬火专用钢)		
Cr12型钢	Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1		
热作模具钢	5CrNiMo、5CrMnMo、4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1		
高速工具钢	W6Mo5Cr4V2		
基体钢	6Cr4W3MoVNB <sup>①</sup> (65Nb)、7Cr7Mo3V2Si <sup>①</sup> (LD-2)、6Cr4Mo3Ni2WV <sup>①</sup> (CG-2)、5Cr4Mo3SiMnVAI <sup>①</sup> (012Al)		
时效硬化塑料模具钢	1Cr3Mn2CuAlMo <sup>①</sup> (PMS)、25CrNi3MoAl <sup>①</sup> 、06Ni6CrMoVTiAl <sup>①</sup> (06Ni)	固溶+时效	固溶态硬度低,加工性好,时效后硬度提高,用于制造精密、复杂的热塑性塑料制品模
不锈钢	20Cr13、40Cr13、95Cr18、102Cr17Mo、14Cr17Ni2	预硬化或淬火	可用来生产耐蚀(如氟塑料、聚氯乙烯塑料、阻燃塑料熔融状态会放出HCl、HF和SO <sub>2</sub> 腐蚀气体)塑料模
沉淀硬化不锈钢	05Cr17Ni4Cu4Nb(17-4PH)、0Cr16Ni4Cu3Nb <sup>①</sup> (PCR)	固溶+沉淀硬化 (固溶+时效)	可用来生产高耐磨、高精度和耐蚀的透明塑料模
无磁不锈钢 无磁钢	12Cr18Ni9、7Mn15Cr2Al3V2WMo <sup>①</sup> (7Mn15)		具有非常低的磁导率,用来生产无磁模具钢
塑料模具钢	B20、B30、B40(非调质钢)		材料成本低,适于制造一般用途的塑料模

注:①为国内研制开发的钢号;  
②目前C钢的应用逐渐减少。

表 7-76 常用冷作模具用材料

钢类别	钢号	应用简述
碳素工具钢 <sup>①</sup>	T7(A)、T8(A)、T10(A)、T12(A)、T13(A)	价廉,用于制造尺寸不大、形状简单、受轻负荷的冷作模零件,其淬透性低、淬火畸变大
高碳低合金工模具钢	9SiCr、9Mn2V、9CrWMn、CrWMn、GCr15	用于制造形状复杂、截面较大、要求耐磨性并承受负荷较大的中、小型冷作模具
	4CrW2Si、5CrW2Si、6CrW2Si	多用于生产高冲击载荷下工作的工模具,如切边凹模等
高耐磨模具钢	Cr12、Cr12MoV、Cr12Mo1V1、7Cr7Mo3V2Si <sup>①</sup> (LD-2)、Cr8MoWV3Si <sup>①</sup> (ER5)、9Cr6W3Mo2V2 <sup>①</sup> (GM)	用于制造高耐磨、微变形、高负荷条件下工作的冷作模具
高速工具钢	W6Mo5Cr4V2、6W6MoCr4V	用于制造重载荷、高寿命、耐磨的冷作模具
基体钢	6Cr4W3Mo2VNB <sup>②</sup> (65Nb)、5Cr4Mo3SiMnVAI <sup>①</sup> (012Al)、6Cr4Mo3Ni2WV <sup>①</sup> (CG-2)、65W8Cr4VTi <sup>①</sup> (LM-1)、65Cr5Mo3W2VSiTi <sup>①</sup> (LM-2)	既具有高速钢的强度、热硬性、耐磨性,又具有低合金模具钢的塑韧性,用于制造高负荷、高速耐冲击的冷、热作模具

(续表)

钢类别	钢号	应用简述
无磁钢	7Mn15Cr2Al3V2WMo <sup>②</sup> (7Mn15)	用于制造无磁模具,生产在强磁场中不产生磁感应的零件
硬质合金	YG15、YG20、YG20C、YG6、YG8A、YG8C、YG11C	具有高硬度、高耐磨、高的抗压强度,主要用来制造拉丝模、顶锻模、冷挤模、冷冲模、拉伸模等
钢结硬质合金	TLMW50、TMW50、W50、GT35等	是硬质合金和模具钢之间的一种新型模具材料,性能介于钢和硬质合金之间,既具有钢的高强韧性,又具有硬质合金的高硬度、高耐磨性。主要用于大批量生产的长寿命模具

注:① 目前碳钢的应用逐渐减少;

② 为国内研制开发的钢号。

表 7-77 常用热作模具用钢

钢类别	钢号	应用简述
低耐热高韧性钢	5CrMnMo、5CrNiMo、4CrMnSiMoV、5SiMnMoV、45Cr2NiMoVSi、5Cr2NiMoVSi、3Cr2MoWVN <sup>①</sup>	用于制造承受很大冲击载荷的锤锻模、机锻模,通常在400℃工作环境下工作
中耐热韧性钢	4Cr5MoSiV、4Cr5MoSiV1、4Cr5W2VSi、4Cr3Mo2MnVB <sup>①</sup> (ER8)、8Cr3、3Cr3Mo3W2V <sup>①</sup> (HM1)、3Cr3Mo3VNB <sup>①</sup> (HM3)、4Cr3Mo3SiV、4Cr4WMoSiV、3Cr3Mo2WVSi <sup>①</sup> 、42Cr9Si2 <sup>②</sup> 、40Cr10Si2Mo <sup>②</sup>	广泛用于制造机锻模、高速锤锻模和压铸模,在500~600℃具有较高的硬度、热强性和耐磨性,有些钢最高工作温度可达650℃。 这类钢淬透性好,φ100 mm工件空冷可淬透,被称为空冷硬化热作模具。 4Cr5MoSiV1应用普遍,常用于制造锤锻模、铝合金压铸模
高耐热性钢	3Cr2W8V、4Cr3Mo3W4VNB <sup>①</sup> (GR)、4Cr3Mo2MnVNB <sup>①</sup> (Y4)、4Cr5Mo2MnVSi <sup>①</sup> (Y10)、4Cr3Mo2NiVNB <sup>①</sup> (HD)、4Cr3Mo2WVMn <sup>①</sup> (TM)、4SiMnW3Mo2VN	合金元素量高,有高的耐热性,即高的高温强度和高温硬度,可以在600~700℃高温下工作,同时具有高的耐磨性,淬透性好,有强烈的二次硬化效果,好的耐回火性,较高的抗疲劳性和断裂韧性。用于制造压铸模以及工作温度较高(约680℃)、高磨损条件下工作的模具。但这类钢塑、韧性和抗冷热疲劳性低于中耐热韧性钢
奥氏体型热作模具钢	45Cr14Ni14W2Mo <sup>②</sup> (CrNi系)、7Mn15Cr2Al3V2WMo(7Mn15)(高锰系)	用于制造要求耐高温、耐蚀、抗氧化的热作模具。加热与冷却过程中均不发生相变,具有很高的耐高温强度和耐热性。缺点是线膨胀系数大、导热性差,降低了其热疲劳性能
沉淀硬化型热作模具钢	25Cr3Mo2NiVSi <sup>①</sup> (PH)	淬火低温回火后机加工(40 HRC),加工后直接使用,使用中表层受热析出碳化物,导致二次硬化(48 HRC),心部未转变。同时具有表层所需的高温强度和心部韧性
高速钢	W6Mo5Cr4V2	工作温度高达600~700℃,具有高强度和好的热硬性,但韧性较差
冷热兼用基体钢	6W8Cr4VTi <sup>①</sup> (LM1)、6Cr5Mo3W2VSiTi <sup>①</sup> (LM2)、6Cr4Mo3Ni2WV <sup>①</sup> (CG-2)、5Cr4W5Mo2V <sup>①</sup> (RM-2)、5Cr4Mo3SiMnVA <sup>①</sup> (012Al)、5Cr4W2Mo2SiV	用于制造热挤压模和精锻模,寿命高于3Cr2W8V钢模具
马氏体时效型耐热钢	00Ni18Co8Mo5TiAl <sup>①</sup> 相当于18Ni(250)、00Cr5Ni12Mo5TiAl(12Ni-5Cr-5Mo)	具有高的耐热性能,在500℃以下工作强度不降低,高温疲劳强度高,抗氧化性能高,并且具有良好的低温性能和抗蚀性。用于制造铝合金压铸模、精密锻模

注:① 为国内研制开发的钢号。

② 按 GB/T 20878-2007 标准。

## 二、常用模具钢的预备热处理

模具钢预备热处理,旨在消除应力、细化晶粒、改善碳化物的形态分布、改善组织、为后续加工工序作准备。常用模具钢预备热处理见表 7-78, 模具常用钢退火、正火、固溶处理工艺参数见表 7-79。

表 7-78 常用模具钢预备热处理

预备热处理种类	目的	热处理工艺特点
均匀化处理	通过高温加热,较长时间保温,使钢中不均匀的元素(尤其是碳)在高温下进行扩散,减轻或尽可能地消除偏析的影响(对某些过共析钢还可减轻液析危害程度),改善材料显微偏析,改善化学成分不均匀性	采用较高的温度和较长的时间(具体的温度和保温时间需根据钢种、偏析或液析程度、材质要求而定)。温度一般 1 100~1 250℃,保温时间可按最大有效截面每 1 h/25 mm 计算,或坯料均温后保温 10 h 缓冷
退火	球化退火	较多用于共析、过共析钢,常见有加热至稍高于 $A_{c1}$ 温度长时间保温后缓冷的工艺或等温球化退火工艺
	调质球化退火	将钢加热至较高温度,使碳化物基本溶解,然后快速冷却至较低温度,或在中温范围等温处理。再将钢加热至稍低于 $A_{c1}$ 的温度进行一定时间的保温,相当于高温回火获得索氏体组织、或进行球化处理
	去应力退火	模具加热到 $A_{c1}$ 以下的某一温度(一般是 550~750℃),均温后保温 2~4 h,随炉冷到 300℃左右出炉
	中间退火	对已淬火的模具返修或旧模具改制进行中间退火,主要目的是消除应力,降低硬度,便于机械加工
碳化物匀细化处理(组织细化处理)	对 3Cr3Mo3W2V、3Cr3Mo3VNb、4Cr5MoSiV1、4Cr3MoNiVNb 等钢,改善坯料中的亚稳共晶碳化物及二次碳化物分布不均匀、链状碳化物沿晶界分布组织不均匀等缺陷	<p>第一步:将坯料在远高于传统退火的加热温度下,进行短时加热均温然后快冷,获得残留碳化物少的不稳定的组织。加热温度与推荐的淬火温度相当或高 30~50℃,油冷到 100~150℃后取出,或用 160~180℃硝盐浴分级后空冷</p> <p>第二步:将坯料再次缓慢加热到 <math>A_{c1} + 20 \sim 30^\circ\text{C}</math> 或 <math>A_{c1} - 50 \sim 70^\circ\text{C}</math>。均温后保温 2~4 h 后缓慢冷却,获得碳化物匀细化的球化组织</p>

表 7-79 模具常用钢退火、正火、固溶处理工艺参数

钢号	加 热		等 温		硬度 HB	备 注
	温度(℃)	时间(h)	温度(℃)	保温时间(h)		
0Cr4NiMoV	890~910	3~4			≤105	
20Cr	860~890	3~4			≤197	
12CrNi3	870~900	3~4			≤229	
T7	750~770	2~4	680~700	4~6	≤197	
9Mn2V	750~770	2~4	680~700	4~6	≤229	
GCr15	770~790	2~4	680~700	4~6	217~255	
7CrSiMnMoV	790~800	2~4	680~700	4~6	217~255	
3Cr2Mo	720~740	3~4			≤255	
3Cr2MnNiMo	720~740	3~4			≤235	

(续表)

钢号	加 热		等 温		硬度 HB	备 注
	温度(°C)	时间(h)	温度(°C)	保温时间(h)		
B30H	740~760	3~4			≤235	
40Cr	830~850	3~4			≤217	
38CrMoAl	840~870	3~4			≤229	
8Cr2MnMoVS	790~810	2~4	700~720	4~6	≤229	
5CrNiMnMoVSCa	760~780	2~4	680~700	4~6	≤229	
40Cr13	850~900	2~4			≤229	
Cr12Mn5NiMo3Al	固溶处理: 980~1 050°C加热, 随后水冷 再调整处理: 700~720°C加热, 随后炉冷				18~22 HRC	
25CrNi3MoAl	850°C加热, 保温 2~4 h, 随炉冷至 680°C 保温 10 h, 随炉冷却。 再 680°C 保温 8 h, 随后水冷至室温				25~28 HRC	
06Ni6CrMoVTiAl	850°C加热, 保温 2~4 h, 随后炉冷或油冷				20~28 HRC	
T10	750~770	2~4	680~700	4~6	≤197	
CrWMn	770~790	2~4	680~700	4~6	217~255	
Cr5MoV	850~870	2~4	720~750	4~6	207~255	
Cr12MoV	850~870	2~4	720~750	4~6	207~255	
Cr12Mo1V1	850~870	2~4	720~750	4~6	207~255	
Cr12	850~870	2~4	720~750	4~6	207~255	
Cr4W2MoV	850~870	2~4	720~750	4~6	207~255	
W6Mo5Cr4V2	850~870	2~4	720~750	4~6	207~255	
W6Mo5Cr4V2Al	850~870	2~4	720~750	4~6	207~255	
W12Cr4Mo3V3N	850~870	2~4	720~750	4~6	207~255	
TLMW50	860~880		720~750	4~6	38~42 HRC	
GT35	820~840		720~750	4~6	39~46 HRC	
6W6Mo5Cr4V	850~870	2~4	740~750	4~6	207~255	
6Cr4W3Mo2VNb	850~870	2~4	740~750	4~6	207~255	
7Cr7Mo2V2Si	850~870	2~4	740~750	4~6	207~255	
5CrW2Si	820~840	2~4	680~700	4~6	207~255	
6Cr3VSi	820~840	2~4	680~700	4~6	≤207	
5CrMnMo	760~780	3~6			197~241	
9Cr6W3Mo2V2	850~870	3~4	730~750	4~6	207~255	代号 GM
4Cr3Mo2NiVNb	840~860	2~4	720~740	4~6	≤217	代号 HD2
5CrNiMo	760~780	3~6			197~241	
4CrMnSiMoV	840~860	2~4	700~720	4~6	197~241	
5Cr2NiMoVSi	780~800	3~6			197~255	
8Cr3	790~800	2~4	710~730	4~6	207~255	

(续表)

钢号	加 热		等 温		硬度 HB	备 注
	温度(°C)	时间(h)	温度(°C)	保温时间(h)		
4Cr5MoSiV	860~890	2~4	700~720	4~6	≤235	
4Cr5MoSiV1	860~890	2~4	700~720	4~6	≤235	
4Cr5W2SiV	860~890	2~4	700~720	4~6	≤229	
3Cr2W8V	840~860	2~4	720~740	4~6	207~255	
3Cr3Mo3W2V	860~880	2~4	720~740	4~6	≤255	
4Cr3Mo3SiV	860~880	2~4	720~740	4~6	≤255	
5Cr4W5Mo2V	860~880	2~4	720~740	4~6	≤255	
5Cr4Mo3SiMnVA1	850~870	2~4	710~720	4~6	≤255	

### 三、常用模具钢的热处理工艺

#### 1. 常用模具钢的淬火

(1) 预热。一段或多段预热可减少模具加热时的表里温差,减少热应力,缩短淬火加热时的保温时间。第一段预热温度 400~600°C,第二段 800~850°C,高合金钢及形状复杂、尺寸较大的模具,可多段预热。

(2) 常用模具钢推荐的淬火加热温度见表 7-80。

(3) 各种材料模具冷却方式及淬火后硬度见表 7-80。表 7-81 中列出了生产中常用的九种冷却方法。

表 7-80 模具常用材料淬火加热温度冷却方式和淬火后硬度

钢号	淬火加热温度 (°C)	冷却方式序号 <sup>①</sup>	淬火后硬度 HRC	备 注
0Cr4NiMoV	830~850	B、E	>58	渗碳—淬火
20Cr	800~820	B、E	>58	渗碳—淬火
12CrNi3	800~820	A、B、E	>58	渗碳—淬火
T7	780~810	C、D,小截面可用 E	>58	
9Mn2V	780~810	B、E	>58	
GCr15	840~860	B、E	>58	
7CrSiMnMoV	880~900	A、B、F、H	>55	
3Cr2Mo	820~860	B、E	>50	也可渗碳(碳、氮共渗)后淬火。淬回火后可渗氮处理
3Cr2MnNiMo	840~860	B、E	>50	
38CrMoAl	920~940	B、C	>50	调质后渗氮处理
40Cr	840~860	B、D、E	>45	也可调质后渗氮
B30H	880~900	A	>33	锻后空冷直接使用
8Cr2MnWMoVS	880~900	B、E、F	>56	
5CrNiMnMoVSCa	880~900	B、E、F	>55	
40Cr13	1 000~1 050	B、E	>50	
T10	790~810	C、D,小截面可用 E	>58	

(续表)

钢 号	淬火加热温度 (°C)	冷却方式序号 <sup>①</sup>	淬火后硬度 HRC	备 注
CrWMn	830~850	B、E、F	>58	
Cr5MoV	940~960	F、G、I	>58	
Cr12MoV	1 020~1 050	A、B、F、G	>58	
Cr12Mo1V1	1 020~1 050	A、B、F、G	>58	
Cr12	960~980	A、B、E	>58	
Cr4W2MoV	980~1 040	A、E、G	>58	
9Cr6W3Mo2V2	1 040~1 100	A、F、G	>60	
W6Mo5Cr4V2	1 180~1 220	F、G、I	>60	
W6Mo5Cr4V2Al	1 200~1 220	F、G、I	>63	
W12Cr4Mo3V3N	1 220~1 240	F、G、I	>63	
TLMW50	1 020~1 050	B、E、F	>65	
GT35	960~980	B、E、F	>65	
6W6Mo5Cr4V	1 180~1 200	F、G、I	>60	
6Cr4W3Mo2VNb	1 080~1 140	B、F、G	>60	
7Cr7Mo2V2Si	1 100~1 140	B、F、G	>60	
5CrW2Si	870~890	B、E	>54	
6Cr3VSi	950~970	B、E	>55	
5CrMnMo	830~850	B、E、H	>50	
5CrNiMo	860~900	B、E、H	>50	
4CrMnSiMoV	880~930	B、E	>50	
5Cr2NiMoVSi	960~1 000	B、F、H、I	>45	
8Cr3	850~880	B、F、H	>55	
4Cr5MoSiV	1 000~1 030	B、F、G、I	>50	
4Cr5MoSiV1	1 000~1 030	B、F、G、I	>50	
4Cr5W2SiV	1 020~1 050	B、F、G、I	>50	
3Cr2W8V	1 080~1 120	B、G、I	>50	
3Cr3Mo3W2V	1 060~1 130	B、G、I	>50	
4Cr3Mo3Si	1 010~1 030	B、F、H	>50	
4Cr3Mo2NiVNb	1 100~1 120	B、F、H	>51	
5Cr4W5Mo2V	1 080~1 120	B、G、I	>54	
5Cr4Mo3SiMnVA1	1 080~1 120	B、G、H	>60	
7Mn15Cr2Al3V2WMo	1 170~1 190	C	>15	固溶处理

注：① 见表 7-81 序号符号。

表 7-81 生产中常用的九种冷却方法

序号	冷却方式	适用钢种	应用范围
A	气冷	高合金钢	形状复杂与易产生淬火开裂和畸变的模具零件
B	油冷	合金钢	截面大形状简单的模具零件
C	水溶性淬火介质	碳素钢及大截面低合金钢	形状简单的模具零件
D	160~180℃碱浴分级停留 3~10 min, 随后空冷到室温	45、T7、T10 等	截面小于 35 mm 形状复杂模具零件
E	160~180℃硝酸盐浴分级停留 3~10 min, 随后空冷到室温	低合金钢	形状较复杂的模具零件
F	250~280℃硝酸盐浴分级停留 3~10 min, 随后空冷到室温	中、高合金钢	形状较复杂的模具零件
G	400~500℃盐浴分级停留 5~15 min, 随后空冷到室温	中、高合金钢	形状较复杂的模具零件
H	模具入油冷至 100~200℃转入 250~300℃炉中保温 1~4 h 后空冷	低、中、高合金钢	截面大形状复杂、容易产生淬火开裂、要求韧性好的零件
I	模具入 400~500℃盐浴分级停留 5~15 min 转入 250~300℃炉中保温 1~4 h, 随后空冷	中、高合金钢	形状复杂, 易产生淬火畸变开裂的模具零件

## 2. 常用模具钢的回火

根据模具零件的设计硬度、强度、韧性的要求选择回火温度。保温时间必须充足,使零件表面和心部温度均匀一致,保证组织充分转变。当选择 220℃ 以下的低温回火时,对一些冷冲模、冷压模和大中型模具,零件回火后需进行线切割加工的,在第一次回火结束后,需进行第二次甚至第三次回火的保温时间应长达 8~12 h,旨在防止线切割加工中和生产使用中发生变形、开裂。淬火后的模具零件一般也要进行两次回火。对大中型模具和有二次硬化的高合金钢模具,应避免未冷到一定温度便带温装炉回火,并要进行 2~3 次回火。部分模具钢回火温度、回火后硬度见表 7-82。表中的回火温度与硬度的对照参考数据,源自部分模具的回火经验,与第一篇钢的回火温度与硬度的对照略有差异。

表 7-82 部分模具常用材料的回火温度、回火后硬度

牌 号	淬火后 硬度 HRC	回火温度(℃)						
		回火后硬度 HRC						
		60~64	58~60	50~55	45~50	40~45	35~40	25~30
0Cr4NiMoV	表面>58	160~200	220~260					
20Cr	表面>58	160~200	250~300					
12CrNi3	表面>58	160~200	250~300					
T7	>58	160~180	200~260	320~360	380~420	420~460	460~520	
9Mn2V	>58	160~200	200~260	320~360	380~420	420~460	460~520	
GCr15	>58	160~200	200~260	320~360	380~420	420~480	480~520	
7CrSiMnMoV	>55	160~200	200~400	400~450	450~500	500~550		
3Cr2Mo	>50				350~450	500~550	550~600	680~710
38CrMoAl	>50							630~670
40Cr	>50			200~300	300~360	360~460	460~480	630~650
3Cr2MnNiMo	>50				350~450	500~550	550~600	
B30H	>33							



(续表)

牌 号	淬火后 硬 度 HRC	回火温度(℃)						
		回火后硬度 HRC						
		60~64	58~60	50~55	45~50	40~45	35~40	25~30
8Cr2MnWMoVS	>55	160~200	200~300	400~500	500~610	610~640	640~680	
5CrNiMnMoVSCa	>50		250~300	400~500	500~600	600~650	650~680	
4Cr13	>50			200~350	350~530	530~570	570~600	
T10	>58	160~180	180~250	320~360	360~420	420~460	460~520	
CrWMn	>58	160~200	200~260 200~220	320~360	360~420	420~480	480~520	
Cr5MoV	>58	160~200	500~520	560~600				
Cr12MoV	>58	160~200	410~430	550~600				
Cr12Mo1V1	>58	160~200	410~430	550~600				
Cr12	>58	160~200	410~430	500~550				
Cr4W2MoV	>58	160~200	410~430					
W6Mo5Cr4V2	>60	540~560						
W6Mo5Cr4V2Al	>64	540~560 (65~67 HRC)						
9Cr6W3Mo2V2	>60	500~540						
W12Cr4Mo3V3N	>64	540~560 (65~67 HRC)						
TLMW50	>64	200~220 (64~66 HRC)						
GT35	>64	200~220 (64~66 HRC)						
6W6Mo5Cr4V	>60	560~580						
6Cr4W3Mo2VNb	>58	500~540	580~600					
7Cr7Mo2V2Si	>60	510~540	590~610					
5CrW2Si	>54		220~280	400~450				
6Cr3VSi	>55		250~300	350~400	400~450			
5CrMnMo	>50				300~400	400~500	500~550	620~650
5CrNiMo	>50				450~500	500~540	540~580	580~680
4CrMnSiMoV	>50				520~570	570~600	600~630	
5Cr2NiMoVSi	>45					640~660	660~680	
8Cr3	>55		200~300	350~400	400~450	450~520		
4Cr5MoSiV	>50			540~560	560~600			
4Cr5MoSiV1	>50			540~560	560~600			
4Cr5W2SiV	>50			540~560	560~580			
3Cr2W8V	>50				560~580	580~630		
3Cr3Mo3W2V	>50			600~630	630~650			
4Cr3Mo3SiV	>50			600~620	610~640			
4Cr3Mo2NiVNb	>50			600~630	630~650	650~700		
5Cr4W5Mo2V	>50			600~630	630~650			
5Cr4Mo3SiMnVA1	>50	500~520	520~580	620~640				
7Mn15Cr2Al3V2WMo	<20					650~670 时效		

## 3. 时效硬化钢的固溶时效处理

时效硬化型模具钢的牌号众多,国内自主研发的有 25CrNi3MoAl、06Ni6CrMoVTiAl、Cr12Mn5Ni4Mo3Al、7Mn15Cr2Al3VMo 等。时效硬化钢的固溶与时效工艺见表 7-83。

表 7-83 时效硬化钢的固溶、时效处理

钢 号	固 溶 处 理		时 效 处 理	
	工 艺	硬 度 HRC	工 艺	硬 度 HRC
Cr12Mn5Ni4Mo3Al	980~1 050℃加热,随后水冷。再调整处理:700~720℃加热随后炉冷	18~22	经-80℃冷处理保温1~2 h后,回升至室温。此时硬度达35~40 HRC,再经510~530℃保温3~4 h时效处理,随后空冷或随炉冷至室温	45~50
06Ni6CrMoVTiAl	850℃加热,保温2~4 h后,炉冷或油冷	25~28	零件经510~530℃保温4 h的时效处理	43~45
25CrNi3MoAl	850℃加热,保温2~4 h,炉冷到680℃保温10 h后,水冷至室温	25~28	零件500~510℃保温6 h的时效处理	39~41
7Mn15Cr2Al3V2WMo	1 150~1 180℃保温20 h后水冷	20~22	650~700℃保温20 h后空冷	48

这些时效钢含有与氮亲和力较强的铬、铜、钒、铝合金元素,若时效处理和渗氮处理同时进行,在提高基体硬度的同时,表面能获得较高硬度(1 000 HV左右)和一定深度的渗氮层,可大幅度提高模具的使用寿命和模压制品的表面质量。

## 4. 模具真空热处理

模具采用真空淬火可以防止零件表面氧化、脱碳、增碳等缺陷,同时能减少淬火开裂和畸变,延长模具的使用寿命。模具真空热处理工艺可参阅第二篇真空热处理章节。

## 5. 模具表面强化处理

模具在淬火、回火之前或之后施以表面强化处理,能显著改善模具的表面性能,不同程度地提高表面硬度、耐磨性、抗咬合性(抗熔损性)、抗擦伤性、降低摩擦因数、提高抗耐热度、提高热疲劳性、耐腐蚀性等。表面强化效果与模具基体性能的良好配合,可大幅度提高模具的使用寿命。

表面强化有两种类型:一是化学热处理,如渗碳、渗氮、碳氮共渗、渗硼、渗金属、表面合金化等;二是表面涂覆一层硬而耐磨的物质,如镀硬铬、镍-磷镀、喷涂硬质合金、沉积合金碳化物、沉积合金氮化物等。

模具表面强化工艺最常用的是渗氮、氮碳共渗、涂覆氮化钛(包括多层复合镀)等,应用于冲裁模、踏弯模、拉伸模、冷挤模、热挤模、热锻模、压铸模、塑料成型模等,模具寿命可提高数倍。表面强化处理可参阅本手册表面改性处理有关章节。

## 6. 模具热处理常见缺陷及预防措施

模具热处理常见的缺陷及预防措施见表 7-84。

表 7-84 模具热处理常见缺陷及预防措施

缺 陷	预 防 措 施
表面氧化、脱碳	根据零件表面的质量要求,合理选择热处理设备,例如充分脱氧的盐浴炉、保护气氛炉、可控气氛炉、流动粒子炉和真空热处理炉等。模具装箱保护、不锈钢皮包装、涂防氧化防脱碳涂料等
畸变与开裂	1) 选用变形趋势小、淬火性能良好的优质模具钢,消除或减轻网状碳化物、带状组织、偏析等材料缺陷 2) 模具尽可能在淬火、回火后进行成型加工,如磨削、线切割、电火花等 3) 合理的结构设计,如减小截面尺寸悬殊,合理布置螺钉孔、销钉孔位置,合理的拼块等

(续表)

缺陷		预防措施
畸变与开裂	淬火回火	4) 淬火温度适当,合理的加热速度,防止晶粒粗大,减少热应力。在满足性能和组织的前提下,尽量选用低的淬火温度和缓慢的冷却方法 5) 淬火冷却后及时回火,选择适当的回火温度,控制残留奥氏体数量。避开在第一类回火脆性区内回火,在第二类回火脆性区回火后快冷 6) 进行多次回火时,上一次回火空冷至接近室温后,再进行下一次回火 7) 冷挤、冷压冲头使用后应进行一次回火 8) 用适当的装夹、包装、堵塞、校正等强制性措施减少开裂与畸变
	线切割、电火花、磨削	1) 正确选材,如 T10A 钢制冷作模,当硬度在 62 HRC 时,线切割开裂可能性极大 2) 在性能许可范围内尽量提高回火温度,例如 Cr12Mo1V1 钢 400℃ 回火与 200℃ 回火相比,其开裂的几率大大降低 3) 制订合理的线切割工艺及电火花成型工艺 4) 高淬透性模具钢及时回火,并确保充分回火,如模具硬度 > 60 HRC、厚度 > 35 mm 时回火时间应 > 8 h 5) 线切割、电火花成型后应进行一次补充回火

## 四、典型模具的热处理实例

### (一) 塑料模具

#### 1. 0Cr4NiMoV 钢冷挤压成型塑料模

0Cr4NiMoV(LJ)是一种冷成型(挤压)专用钢。退火后(880℃, 2 h 炉冷至 650℃ 出炉空冷)硬度 100~

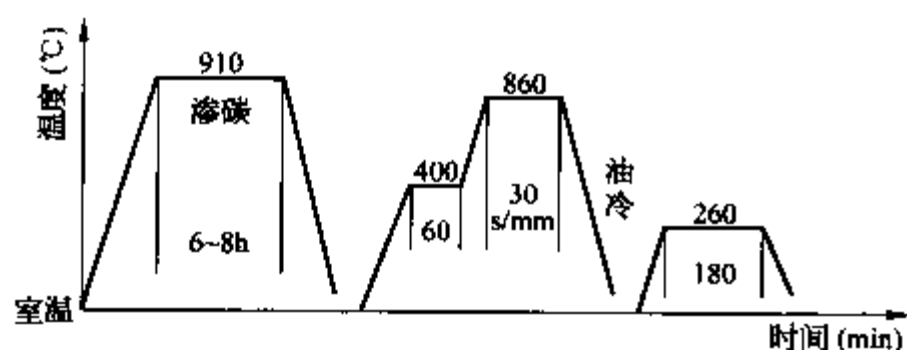


图 7-73 0Cr4NiMoV 钢塑料模热处理工艺曲线

105 HB,可顺利进行冷挤压成型,制成型腔轮廓清晰的精密塑料模。然后渗碳淬火,表面高硬度,耐磨性好,使用时不易出现型腔表面塌陷和咬合现象。

技术要求: 渗碳深度 > 1 mm、表面硬度 > 50 HRC、表面镀硬铬 0.01~0.015 mm。

加工流程: 坯料机加工—冷挤成型—机加工—渗碳—机加工—淬火回火—机加工—抛光—镀硬铬—研光。热处理工艺曲线如图 7-73。

#### 2. H 型塑料外壳式断路器的外壳模

7CrSiMnMoV(CH, CH-1)是一种火焰淬火专用钢,可整体加热淬火或火焰表面淬火;常用作冷作模具钢,也可兼用作塑料模具钢。该钢的淬火温度范围宽,过热敏感性低,淬透性好,空冷即可淬硬。

技术要求: 硬度 50~55 HRC、型面镀硬铬 0.01~0.015 mm。

加工流程: 坯料机加工—淬火、回火—机加工—抛光—镀硬铬—研光。热处理工艺曲线如图 7-74。

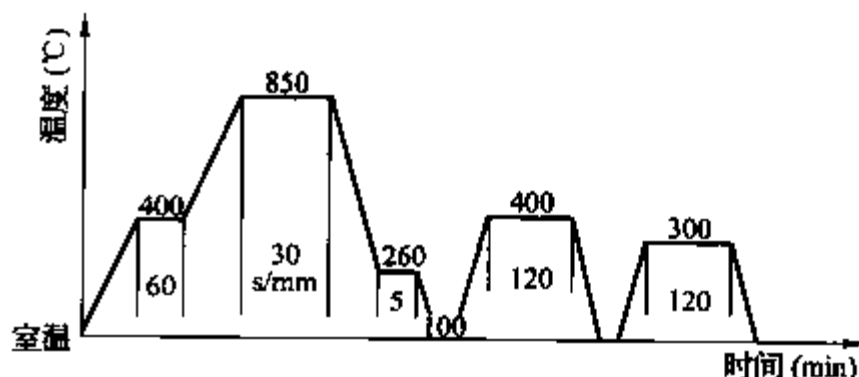


图 7-74 7CrSiMnMoV 钢塑料模热处理工艺曲线

#### 3. 磁带盒塑料模

磁带盒塑料模用 5CrNiMnMoVSCa 钢制

造。5CrNiMnMoVSCa(5NiSCa)是一种易切削塑料模具钢,切削加工性好,抛光性好,可以预硬化状态交货;适宜于制造各类型的塑料精密注塑模、压塑模和橡胶模等。

技术要求: 基体硬度 40~42 HRC,型面光亮。

加工流程：坯料粗加工—淬火、回火—机加工成型—抛光。热处理工艺曲线见图 7-75。采用减少畸变的分级淬火法，淬火硬度 60~63 HRC；回火后硬度为 40~45 HRC。

#### 4. 3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo 钢大、中型塑料模具

3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo 是国内外广泛应用的塑料模具钢，适于制造各种大、中型或特大、大型的精密塑料模。该类钢大部分以预硬化状态交货，硬度为 28~38 HRC，钢模块可直接加工成模具使用，避免热处理引起的模具畸变导致精度下降。用户根据切削加工性、抛光性的不同要求选取不同的硬度范围。有的企业也有最后再作渗氮处理，以进一步提高模腔的耐磨性和耐腐蚀性。

国内外许多企业对此类钢稍作成分调整，并以自行规定的牌号供应市场。表 7-85 为一些国内市场常见的牌号。

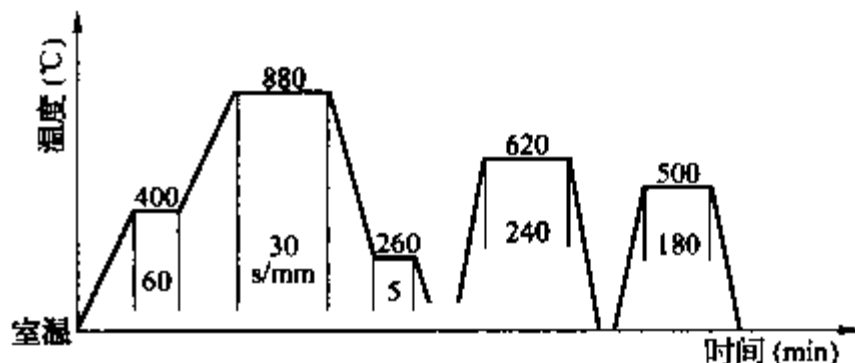


图 7-75 5CrNiMnMoVSCa 钢塑料模热处理工艺

表 7-85 类似 3Cr2Mo、3Cr2MnNiMo 钢的牌号

中国 GB/T1299	中国 YB/T094.107.129	宝钢特钢	东北特钢 抚顺	瑞典 ASSAB	奥地利 Böhler	日本 大同	韩国 斗山	日本 日立	德国 德威
3Cr2Mo (ISC T22020)	SM3Cr2Mo	SWP20H	FT61	618 618H	M201	PXZ (PDS3)	HP-4A		GSW-2311
3Cr2MnNiMo (ISC T22024)	SM3Cr2NiMo SM3Cr2Ni1Mo	SW718H	FT62	718 718H	M238	PX4 PX5	HP-4MA	HPM2 (易切削) HPM7	GSW-2738

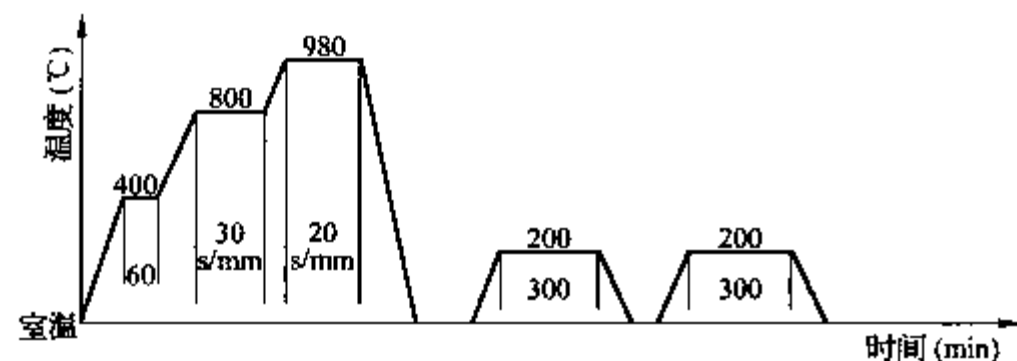


图 7-76 Cr12 钢瓶盖冷挤模热处理工艺曲线

### (二) 冷作模具

#### 1. 瓶盖冷挤模

用 Cr12 钢制造，被挤零件为 0Cr4NiMoV 钢，要求硬度 61~63 HRC。

加工流程：坯料机械加工成型—淬火、回火—抛光。热处理工艺曲线如图 7-76，采用“低淬低回”的一次硬化法工艺。

对于 Cr12 型莱氏体钢，必须通过锻造（一定锻比、反复锻拔、多向锻造），击碎共晶碳化物，以改善或消除碳化物的不均匀性。退火态交货的 Cr12 型钢共晶碳化物的合格级别见表 7-86。

表 7-86 Cr12 型钢共晶碳化物合格级别(退火态)

钢材直径或边长(mm)		≤50	>50~70	>70~120	>120
共晶碳化物不均匀度合格级别(退火态)	I 组	3	4	5	6
	II 组	4	5	6	协议

注：按 GB/T14979 第四评级图评定。取样位置： $\phi 25 \sim 60$  mm 为心部， $\phi > 60$  mm 为 1/4 直径处。

为了提高 Cr12 钢的使用寿命，有采用碳化物匀细化处理，先在 1 100~1 150°C 温度下加热保温淬热油或等温淬火（亦称固溶），然后高温回火（750°C，1 h）获得索氏体组织；或球化退火获得球状组织，使碳化物细匀，棱角圆整化。还有采用循环细化工艺同时使奥氏体晶粒细化（双细化处理），即在第一次固溶处理后，再增加一次低温淬火（960°C 加热），油冷至约 300°C 左右出油空冷，然后在 180°C 左右低温回火。

## 2. H形塑壳开关灭弧片冲模

冲模的凹凸模均用 Cr12Mo1V1 钢制造。技术要求：凹凸模硬度 58~60 HRC，凹模渗氮层深度 0.05~0.07 mm，硬度 >1 000 HV，无白亮层。灭弧片材料 10 钢，厚度 1.5 mm。模具使用寿命冲冷轧钢板刃磨一次 7 万件。

凸模加工流程：坯料机加工—淬火、回火—磨削成型。淬火回火工艺曲线如图 7-77 所示。

凹模加工流程：坯料机加工—淬火、回火—线切割成型—低温回火—刀口研磨—渗氮。淬火回火工艺曲线如图 7-78 所示。低温回火 200℃，保温 3 h。渗氮温度 510℃，保温 6 h。

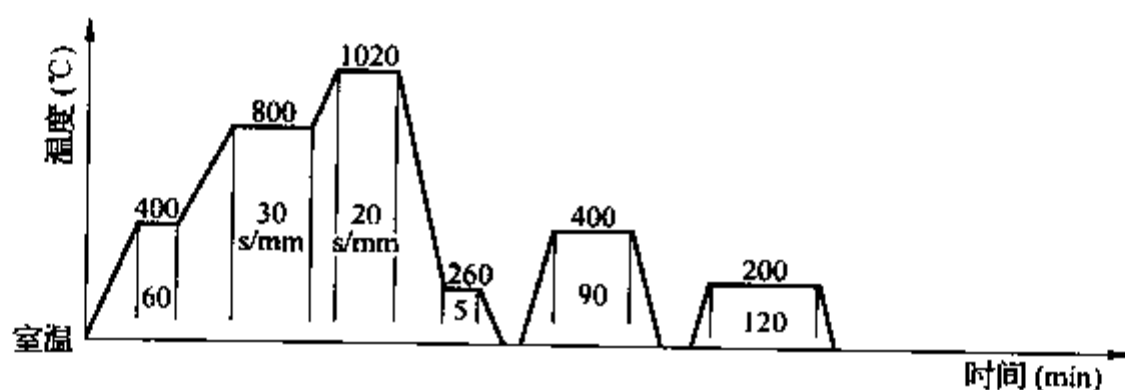


图 7-77 Cr12Mo1V1 钢灭弧片冲模凸模热处理工艺

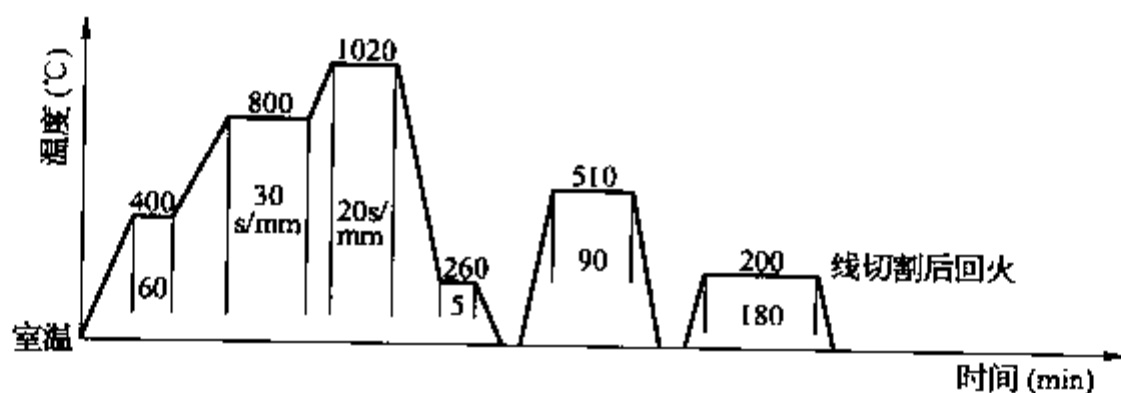


图 7-78 Cr12Mo1V1 钢灭弧片冲模凹模热处理工艺

表 7-87 为各国类似 Cr12Mo1V1 钢的牌号。

表 7-87 Cr12Mo1V1 钢对应的钢号或牌号

中国 GB/T1299	美国 AISI 或 ASTM	德国 DIN	日本 JIS	奥地利 Böhler	瑞典 ASSAB	日本 大同	日本 日立	韩国 斗山	德国 德威
Cr12Mo1V1 (ISC T21202)	D2	1. 2379 X155CrMoV12-1	SKD11	K110	XW-42	DC11	SLD HMP31	STD-11	CrSW- 2379

Cr12Mo1V1 钢常规热处理方法有：一次硬化法，即较低的淬火温度（980~1 040℃）和低温回火（180~230℃）；由于加热温度低、晶粒细小、强韧性好且残留奥氏体少，通常可获得高硬度及较高韧性，但抗压强度低。二次硬化法，即较高的淬火温度（1 060~1 100℃）和多次高温回火（510~540℃），由于加热温度高，可以改善红硬性，提高淬透性，并获得二次硬化效果；通常可获得较高的硬度及抗压强度，但韧性差，适用于工作温度比较高（400~500℃）的模具，或淬后需表面渗氮处理的模具。

近期有采用中温淬火（淬火温度介于两者之间）及中温回火（400℃）的工艺可获得最好的强韧性，处理的冷镦模断裂抗力增高，寿命增加。本例的凸模处理工艺就属此方法。

## 3. 缝纫机梭壳冷挤冲头

缝纫机梭壳冷挤冲头用 W6Mo5Cr4V2 钢制造。梭壳材料 20Cr 钢，坯料表面磷化，用反挤法成型。技术要求：基体硬度 61~63 HRC，表面渗氮深度 0.05~0.07 mm，表面硬度 >1 000 HV。

加工流程：坯料粗车—淬火、回火—型面及定位锥体车正—渗氮。淬火、回火工艺曲线见图 7-79。渗氮

温度 540℃,保温 6 h。冲头的使用寿命为 25 000 次左右。

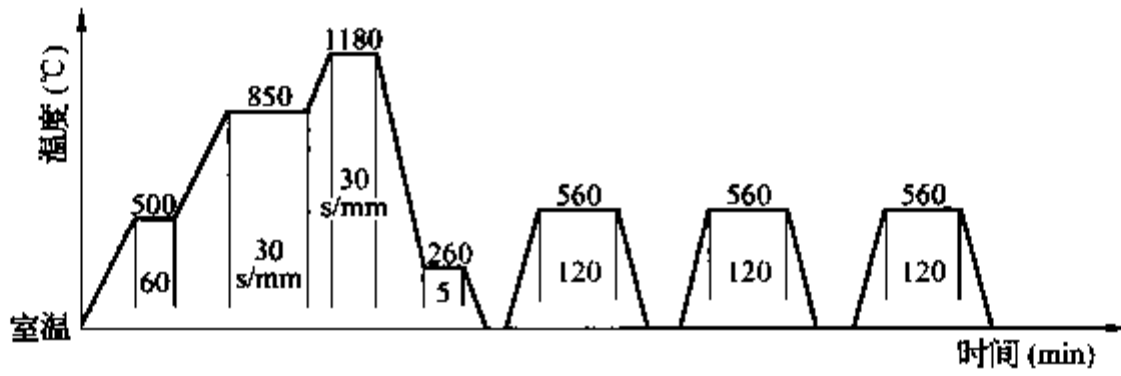


图 7-79 W6Mo5Cr4V2 钢冷挤冲头热处理工艺

(三) 热作模具

1. 吊环螺钉锤锻模

吊环螺钉锤锻模用 5CrNiMo 钢制造,锻锤 750 kg。热锤锻模通常按锻模的高度(包括燕尾)和相应的锻锤吨位,分为四类相应的硬度,见表 7-88。

表 7-88 锤锻模的硬度选择范围

模具类型		锻锤吨位 (t/kN)	模面硬度 HRC	燕尾硬度 HRC
型号	锻模高度(mm)(包括燕尾)			
小	<275	<1/9.8	42~39	35.0~39.5
中	275~325	1/9.88~3/29.4	42~39	32.5~37.0
大	325~375	4/39.2~6/58.8	40~35	30.5~35.0
特大	>375	>6/58.8	37~34	27.5~35.0

本例模面硬度 40~42 HRC、燕尾硬度 35~39 HRC,热处理工艺曲线见图 7-80。燕尾部分回火在专用炉中进行。吊环材料 20 钢。模具使用寿命在 5 000 只以上。

锤锻模一般推荐的淬火温度 5CrNiMo 钢为 830~860℃。经保温后预冷至 780℃左右后油冷,至 150~180℃或 200℃左右出油,然后立即回火。本例选用较高淬火温度。

5CrNiMo 钢对淬油冷却时间有较严格的要求,油冷时间的估算见表 7-89。

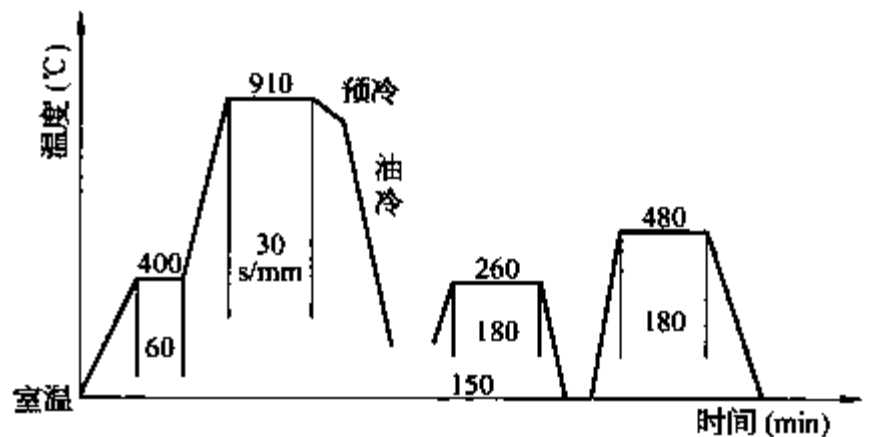


图 7-80 5CrNiMo 钢吊环螺钉锻模热处理工艺

表 7-89 5CrNiMo 钢锻模油冷时间的估算

估算公式	模具冷却情况
$t = [h/100 + (1 \sim 1.2)]^2 \times 4$	出油温度 200℃左右
$t = (1.12 \sim 1.28)V/S$	静置油取系数 1.28, 搅拌油取 1.12, 出油温度 90~130℃
$t = 0.32V/S$	出油温度 220~250℃
$t = (h/40)^2 + ab/40(a+b)$	适用于小锻模油中分级后再等温处理

\* t 为冷却时间(min), a、b、h 分别为锻模的长、宽、高(mm), V 锻模体积, S 锻模表面积。

## 2. 4Cr5MoSiV1 钢制铝合金压铸模

(1) 摩托车发动机汽缸盖铝合金压铸模用 4Cr5MoSiV1 钢制造。

技术要求：硬度 42~44 HRC，渗氮深度 0.05~0.07 mm，表面硬度 >850 HV，无白亮层。

加工流程：坯料机加工—去应力—精加工—淬火、回火—精加工、修正—抛光—试模—抛光—渗氮。

采用真空炉淬火、回火工艺曲线如图 7-81 所示。去应力温度 550℃，保温 3 h 后炉冷。渗氮温度 540℃，保温 5 h。模具使用寿命 5 万次。

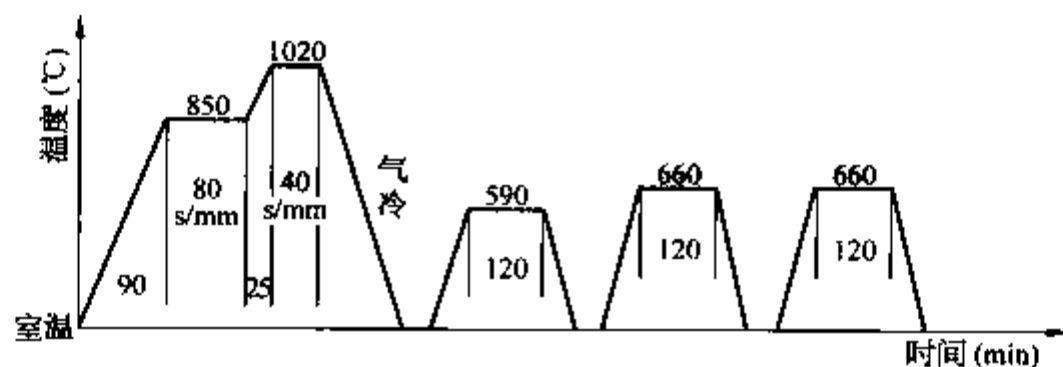


图 7-81 4Cr5MoSiV1 钢铝合金压铸模热处理工艺曲线

4Cr5MoSiV1 钢主要用作铝合金压铸模、热锻模以及塑料模等。经改良的 4Cr5MoSiV1 钢国内外市场上牌号众多，表 7-90 为一些常见的牌号。

表 7-90 4Cr5MoSiV1 近似的国内外牌号

中国 GB/T1299	宝钢 特钢公司		东北特钢 抚顺	美国 AISI ASTM	德国 DIN	奥地利 Böhler
4Cr5MoSiV1 ISC T20502	优质 G 级 4Cr5MoSiV1 高级 Q 级 4Cr5MoSiV1 特殊质量级 P 级 SWPH13		F413 F413(电渣)	H13	1.2344 X4Cr5MoV51	W302
日本 JIS	日本 大同	日本 日立	韩国 斗山	瑞典 ASSAB	法国 AUBER&DUVAL	
SKD61	DH1 DH2	FDAC	STD-61	8407 ORVAR SUPREME	ADC3	

(2) 4Cr5MoSiV1 常规热处理工艺：

淬火加热温度一般为 1 020~1 050℃，要求韧性较好的模具取下限加热温度，要求热硬性为主的模具取上限加热温度。

淬火加热保温时间：一般盐浴炉加热系数 0.3~1 min/mm；  
空气炉加热系数 1.5~2.4 min/mm；  
真空炉加热系数 2~3 min/mm。

淬火冷却：小型薄壁件空冷，形状简单件及大件油冷，复杂件分级冷却，分级温度 500~560℃ 或 350~500℃，甚至 180~220℃。真空炉加热一般高压  $(5\sim6)\times 10^5$  Pa，高流率氮气气淬。

回火温度一般 530~580℃，保温时间取 1 h/25 mm(至少每次不少于 4 h)。500℃ 回火时会出现二次硬化峰，硬度最高，但韧性最差，应避免在此温度回火。530℃ 回火仍保持马氏体针的组织形态，直至 630℃ 回火才基本消除。

(3) 提高 4Cr5MoSiV1 钢模具使用寿命的几个主要环节：

4Cr5MoSiV1 钢对钢中的杂质及夹杂物有较高要求(表 7-91)。要求有高的纯净度及等向性，并需要改善亚稳共晶碳化物形态，消除或改轻链带或网状碳化物的分布。

4Cr5MoSiV1 钢制造模具的用途不同、尺寸不同及复杂程度不同，选取的硬度值也不同，见表 7-92、表 7-93。

表 7-91 国外 H13 钢杂质及夹杂物标准

类 别		优 质 钢		特 优 钢	
杂质元素	$w_S(\%)$	$<0.005$		$<0.003$	
	$w_P(\%)$	$\leq 0.025$		$\leq 0.015$	
夹杂物		细 系	粗 系	细 系	粗 系
	A 硫化物	1.0	0.5	0.5	0.5
	B 氧化铝	1.5	1.0	1.5	1.0
	C 硅酸盐	1.0	1.0	0.5	0.5
	D 球状氧化物	2.0	1.0	1.5	1.0

表 7-92 4Cr5MoSiV1 钢按用途选择硬度值

类 别	铝合金压铸模	挤压模	热锻模
硬度 HRC	42~48	44~50	44~52

表 7-93 4Cr5MoSiV1 钢按尺寸及复杂程度选择硬度值 HRC

类 型	复 杂 模	简 单 模
小 型	46~48	48~52
中 型	42~44	44~46
大 型	40~42	42~44

在 4Cr5MoSiV1 钢模具的热处理过程中,必须针对模具的服役条件,正确选择淬火加热温度,避免二次碳化物网的出现。冷却中模具心部应避免出现大量的上贝氏体组织,防止因高温回火出现贝氏体脆性。一般模具试模后可进行渗氮或氮碳共渗处理,以提高抗熔损现象,但应严格控制白亮层厚度和脉状氮化物的形态分布,并根据工况确定合理的扩散层深度。模具从第一次渗氮或氮碳共渗后投入使用至报废,中间还可进行 1~2 次的渗氮或氮碳共渗处理(可结合模具去应力处理进行)。

### 3. 3Cr2W8V 钢制铜合金压铸模

H59 黄铜压铸模用 3Cr2W8V 钢制造。技术要求:硬度 38~40 HRC。

加工流程:坯料加工—去应力—精加工—淬火、回火—精加工—修正抛光。3Cr2W8V 钢铜合金压铸模热处理工艺见图 7-82。使用寿命 $\leq 1$ 万次。

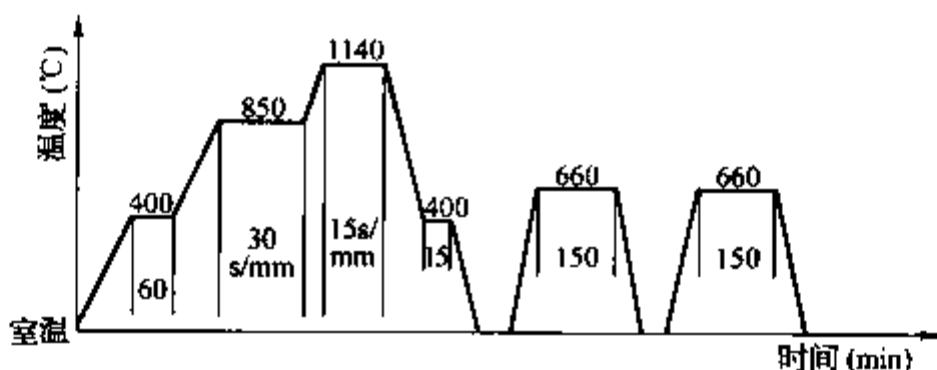


图 7-82 3Cr2W8V 钢铜合金压铸模热处理工艺

### 4. 3Cr3Mo3VNb 钢制铝合金压铸模

48 in 吊扇上下盖的铝合金压铸模用 3Cr3Mo3VNb 钢制造。

技术要求:硬度 44~48 HRC,表面离子氮碳共渗,深度 0.15~0.20 mm,表面硬度 $>1000$  HV。

加工流程:坯料匀细化处理—机加工—去应力—淬火、回火—精加工、修正—抛光试模—抛光—离子氮碳共渗。



3Cr3Mo3VNb 钢坯料碳化物需先进行匀细化处理,热处理工艺为:预热 800℃加热 1 070℃保温后人油冷却到 150℃左右,取出放入 850℃炉中保温 3 h 后炉冷。模具的真空淬火、回火及离子氮碳共渗工艺曲线见图 7-83。模具使用寿命>15 万次。

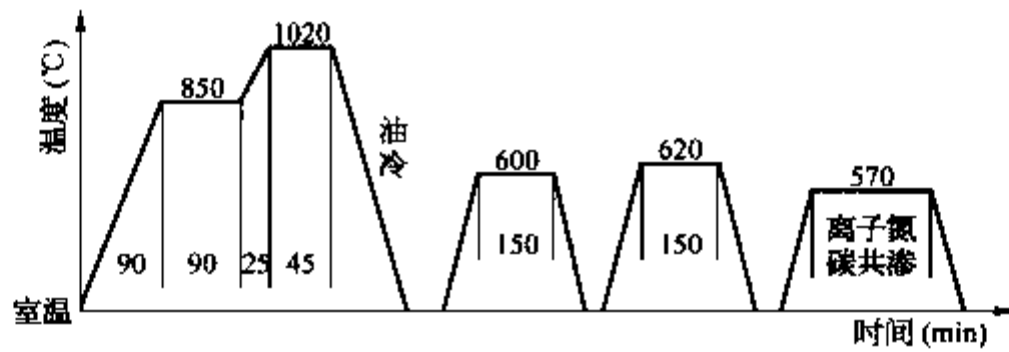


图 7-83 3Cr3Mo3VNb 钢铝合金压铸模热处理工艺

#### 5. 4Cr3Mo2NiVNb(代号 HD)钢制铜管穿孔针

穿孔针是对热挤压桶内的铜锭(800~850℃)进行穿孔和定位,保证铜管准确成型,直至一个挤压周期结束。它反复受到机械拉伸、弯曲、摩擦、加热、冷却的作用,常常以直径变细、拉断、磨损、疲劳开裂而报废。该钢经热处理后,在 700℃下仍可保持 40 HRC 的硬度。选用 4Cr3Mo2NiVNb 钢后使用寿命比原来用 3Cr2W8V、4Cr5MoSiV1 钢提高 10 倍。

技术要求:硬度 48~50 HRC。

加工流程:坯料机加工—淬火、回火—精加工成型。热处理工艺曲线见图 7-84。

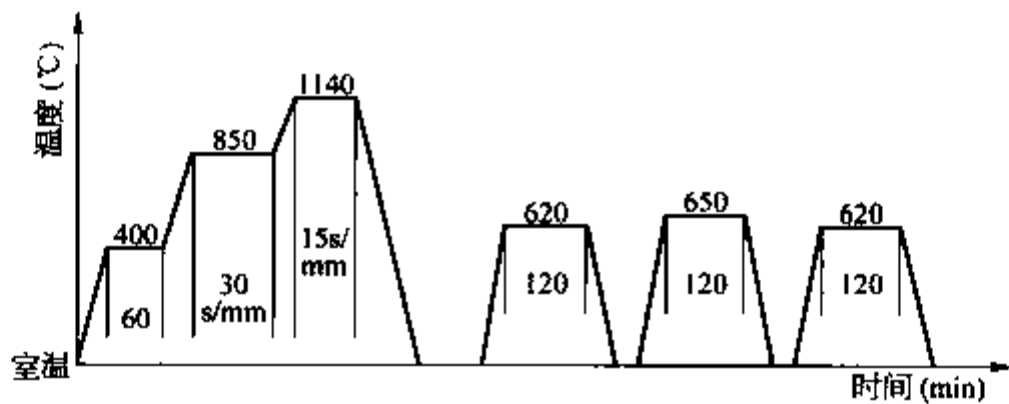


图 7-84 4Cr3Mo2NiVNb 钢穿孔针热处理工艺

4Cr3Mo3NiVNbB(HD2) 钢是 HD 钢的改进型钢,在保持 HD 钢高强度的基础上,进一步提高了韧性,提高了室温和高温力学性能,并具有良好的热稳定性及工艺性能,适用于加工铜管热挤压模的穿孔针。

## 第六节 紧固件、滚动轴承零件热处理

### 一、紧固件热处理

#### 1. 通用螺纹紧固件的强度与螺纹脱碳要求

通用螺纹紧固件在一般大气环境条件下使用,按抗拉强度和屈服强度值的大小,分为 10 个等级,抗拉强度与屈服强度要求见表 7-94。高强度螺纹紧固件在螺纹纵向截面上的脱碳层要求见图 7-85。8.8 级以上紧固件一般称为高强度紧固件,全脱碳层的最大深度  $G$  为  $0.015 \text{ mm}$ 。8.8 级、9.8 级螺纹未脱碳层的最小高度  $E$  为  $H_1/2$ ,10.9 级为  $2H_1/3$ ,12.9 级为  $3H_1/4$ 。

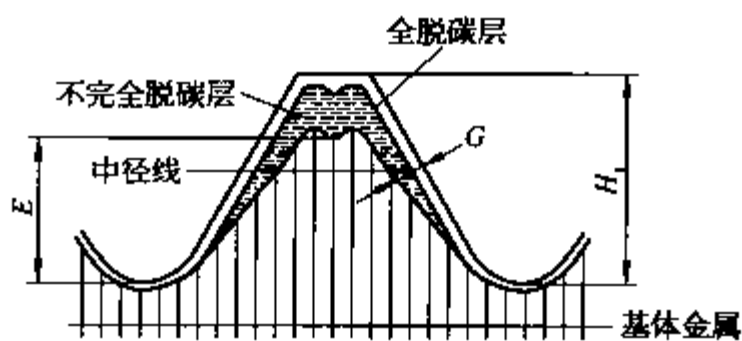


图 7-85 高强度螺纹紧固件在螺纹纵向截面上的脱碳层

表 7-94 螺栓、螺钉、螺柱的抗拉强度与屈服强度

机械性能		性能等级										
		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8		9.8	10.9	12.9
								≤M16	≥M16			
$R_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	公称	300	400	400	500	500	600	800	800	900	1 000	1 200
	min	330	400	420	500	520	600	800	830	900	1 040	1 220
屈服强度 $R_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	公称	180	240	320	300	400	480					
	min	190	240	340	300	420	480					
$R_{p0.2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	公称							640	640	720	900	1 080
	min							640	660	720	940	1 100

性能等级的表达：小数点前的数表示公称抗拉强度( $R_m$ )的 1/100；小数点后的数 6、8、9，表示屈服强度( $R_s$ )或公称屈服强度( $R_{p0.2}$ )与公称抗拉强度( $R_m$ )之比值(屈强比)的 10 倍。

2. 通用螺纹紧固件的常用材料

制造不同强度等级、不同直径螺栓的常用材料选择见表 7-95。制造各个性能等级螺母的材料，一般均选择中碳素结构钢或中碳合金结构钢，与制造螺栓、螺钉、螺柱相比较，螺母用材料相对简单。

表 7-95 制造不同强度等级、不同直径螺栓的常用材料选择

公称螺纹直径 (mm)	强度等级									
	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9	12.9	
	钢材的选择									
<6	Q215A	20		30		35、45		35、45		40Cr 35CrMo ML35CrMo 30CrMnSi
	Q235	30		35		15MnB		15MnVB		
	Q255A	35		45		ML30		ML35		
	10	ML20		15MnB		ML35		ML45		
	15	ML30		ML30		ML45		ML15MnVB		
6~12	20	ML35		ML35						
	BL2	Y15		ML45		Y15		40Cr		
12~24	BL3							20MnVB		
	ML10					35、45		20MnTiB		
	ML15					15MnB		ML40Cr		
	ML20					20MnVB		ML20MnVB		
	Y12					20MnTiB		ML20MnTiB		
24~30						ML20MnVB				
						ML20MnTiB				
						20Cr		35CrMo		
						20CrMnTi		40CrMn		
						20MnVB		42CrMo		
					ML20CrMn		ML35CrMo			
					ML20MnVB					

3. 紧固件的热处理

- 1) 用于制造紧固件的材料预备热处理(表 7-96)
- 2) 紧固件的最终热处理

(1) 最终热处理的对象是成品或半成品。对于力学性能为 8.8、9.8、10.9、12.9 级的高强度螺纹紧固件，以及 05、8、10、12 级的螺母，所用材料均为低碳合金结构钢或中碳素(或合金)结构钢，均以调质处理作为最终热处理，热处理的工艺参数可参照相关钢种的技术资料进行选择。

表 7-96 用于制造紧固件的材料预备热处理

工艺名称		目的	热处 理 工 艺
退 火	再结晶退火	消除材料冷拉(拔)后的冷作硬化	应考虑材料变形量与再结晶时的晶粒度之间的关系,防止晶粒长大。一般压缩比为 20%~40%的钢材,选择 $A_1$ 附近温度。含碳量低的钢退火温度在 660~720℃ 之间; $w_c$ 0.30% 以上的钢材,退火温度在 720~760℃ 之间,保温 2~3 h 后炉冷至 550℃ 出炉空冷
	球化退火	冷作用钢经退火后,硬度低、塑性好,成型过程中不易产生裂纹	普通球化退火,以 120~150℃/h 速度升温,在 700~760℃ 温度范围保持 4~6 h,然后以约 30℃/h 的速度冷却至 550℃ 以下出炉
	等温退火		主要适用于中碳合金结构钢,将钢加热到 750~780℃ 保温 4 h 后,随炉冷却到 $(670 \pm 10)$ ℃ 再保温 3~4 h,然后炉冷至 500℃ 以下出炉
正 火	获得片状珠光体+铁素体,使钢具有良好的切削性能	适于处理含 $w_c < 0.45\%$ 的碳钢和 $w_c < 0.20\%$ 的合金结构钢。将钢加热至 $A_{c3}$ 以上 30~60℃ 温度,保温 2~3 h 后出炉空冷	

(2) 采取盐浴炉或控制气氛炉加热,可基本保证螺纹不出现脱碳。对于用冷镦或冷挤成形的紧固件,原材料的脱碳层不仅依然存在,还被挤向螺纹顶尖处,使螺纹的全脱碳层和半脱碳层超过标准允许的范围。这时若在氮基或吸热式气氛控制气氛炉中进行淬火加热,可在气氛中加入适量的含一定碳势的富化剂(如  $CO$ 、 $CH_4$ ),在加热紧固件的同时对脱碳的表面进行适当的复碳,将螺纹的脱碳层深度控制在合格范围。复碳技术的实施必须经过试验后谨慎进行,尽可能使表面碳势与钢材的碳势一致,切不可使螺纹表层碳势超出钢材自身含碳量过多,淬火后使螺纹表面的脆性增加。

#### 4. 专用紧固件的材料及其热处理(表 7-97)

表 7-97 专用紧固件的材料及其热处理

紧固件类型	常用材料	性能要求	热处 理 工 艺
紧定螺钉	紧定螺钉按力学性能(硬度)要求不同分为四类: 14H、22H、33H、45H。材料和热处理方法与通用螺纹紧固件基本相同		
自攻螺钉 <sup>①</sup>	10、15 碳钢等	表面硬度 50~58 HRC, 心部硬度 270~290 HV0.3	采用鼓形转罐炉或网带式炉进行浅层渗碳或碳氮共渗—淬火—低温回火后,使螺钉表层有 0.05~0.20 mm 的硬化层
耐腐蚀螺纹紧固件	奥氏体不锈钢 1Cr18Ni9Ti 等	在不同浓度和温度的多种强腐蚀性介质中,如硫酸、磷酸、甲酸、醋酸、尿素等,表现出良好的耐腐蚀性能	固溶+时效。如 1Cr18Ni9Ti, 1 100~1 150℃ 加热并保温后淬水冷却,在 800℃ 温度时效 8~10 h,抗拉强度为 641 MPa,室温下为单相奥氏体组织
	马氏体不锈钢 12Cr13、20Cr13、 30Cr13、10Cr17、 14Cr17Ni2 等	耐腐蚀,有好的强韧性、高硬度,以及良好的耐磨性等 在弱腐蚀介质(如盐水溶液、一定浓度的硝酸、醋酸及若干浓度不高的有机酸等)中,温度不超过 30℃ 的情况下具有良好的耐腐蚀性	12Cr13: 950~1 000℃ 淬油, 230~650℃ 的不同温度回火,抗拉强度在 1 276~715 MPa,硬度在 380~170 HB 范围 20Cr13: 1 050℃ 淬油或空冷, 500~660℃ 的不同温度回火,抗拉强度在 1 225~833 MPa 范围
	铁素体不锈钢 06Cr13、10Cr17 等	对硝酸和多种有机酸(除草酸、蚁酸、醋酸外),具有良好的耐腐蚀性	在退火状态下使用

(续表)

紧固件类型	常用材料	性能要求	热处理工艺
耐高温与低温的螺栓和螺母	高温状态下长时间工作 35CrMo、25Cr2MoV、 25Cr2Mo1V、 20Cr1Mo1VTiB、 20Cr1Mo1VNbB等	一般要在 400~600℃ 温度下长期工作,保证紧固件在高温下的力学性能稳定	最终热处理常采用调质或正火+高温回火处理,回火温度应高于工作温度
	低温状态下长时间工作 30CrMo、35CrMo、 42CrMo等	一般钢材(不包括硼钢)在低于-30℃ 温度环境工作,冲击韧度降低较小,需进行适当的热处理,使钢保持一定的韧性	调质处理。如 30CrMo、35CrMo、42CrMo,进行调质处理,且回火温度越高(580~700℃),对低温下的韧性影响越有利
耐磨紧固件	用 Q235A、Q235B、 10、15、20、15Cr 等低 碳钢,经冷锻或冷挤 成形,还有 Y12 易切 削钢、35 钢等	要求具有较好的耐磨性,如部分 轮胎螺栓需要经常拆装	表面浅层渗碳或碳氮共渗。一般螺距在 1 mm 以下,渗层深度取 0.05~0.15 mm; 螺距在 1 mm 以上,渗层深度取 0.15~ 0.30 mm,表面硬度 76~85 HRA
	35、45、40Cr、 35CrMo、42CrMo 等	紧固件局部要求耐磨,如内燃机 进排气门开启间隙的调节螺钉等	整体经调质处理硬度达 26~31 HRC, 与挺杆接触的螺钉头部,需进行高频感应 淬火,淬硬层深 1.2~1.5 mm,表面硬度 52 HRC
	不锈钢	提高紧固件的耐磨和抗咬合性	进行较高温度(如 620℃ 左右)气体渗 氮、离子渗氮或氮-碳共渗等

注:① 自攻螺钉有 11 个号数,螺纹大径从 2.24~8 mm 不等。

## 二、滚动轴承零件热处理

### (一) 滚动轴承的结构、服役条件和失效形式

常见的滚动轴承一般由内套圈、外套圈、滚动体、保持器四大件组成,其内径最小为 0.6 mm,外径最大约为 5 m 左右。滚动轴承零件的工作特点是以点接触或线接触的形式,在高的交变接触应力和高转速条件下长期工作。轴承工作环境可能是高负荷(接触应力可高达 4 900 MPa)、超高温(>1 000℃)、超低温(<-253℃)、强腐蚀(酸、碱、王水和高温苛性钠等)以及超高真空( $1.33 \times 10^{-9}$  Pa),或强冲击、强磨料磨损、无磁等。苛刻的工作环境要求可能是单项,也可能是多项复合恶劣条件的综合。不论是普通轴承还是特种专用轴承,失效形式主要是疲劳磨损。

### (二) 轴承材料的基本要求

轴承的结构特点和工作条件要求轴承材料必须具备高的硬度、高的耐磨性、高的接触疲劳强度、高的弹性极限,及良好的冲击韧度、断裂韧性、尺寸稳定性、防锈性能和冷热加工性能等。用于制造轴承的轴承钢,必须严格保证化学成分,具有特别高的纯净度、低级别的非金属夹杂物、极低的氧含量和微量元素,严格的低倍、高倍显微组织。对于碳化物的不均匀性、表面脱碳层和内部疏松、偏析、孔隙等均有严格的要求,不允许存在裂纹、夹渣、毛刺、折叠、结疤、氧化皮、缩孔、气泡、白点和过烧等表面、内部缺陷。

### (三) 滚动轴承零件热处理的特点

除了残留奥氏体含量外,对于几乎所有热处理指标,如硬度、显微组织、网状碳化物、裂纹、脱碳及软点、套圈变形、钢球压碎载荷、抗回火性、断口、奥氏体晶粒度等技术要求,国家或行业都有详细的标准规定。

#### (四) 相关标准

我国目前常见、常用的轴承材料和热处理相关标准见表 7-98。

表 7-98 常见、常用的轴承材料和热处理相关标准

名称	主要用途和常用材料	国标或参考标准
通用标准		JB/T7361 滚动轴承零件硬度试验方法 JB/T7362 滚动轴承零件脱碳层检查方法
铬轴承用钢	制造滚动轴承零件(套圈和滚动体)的最主要钢种。GCr15、GCr15SiMn 是目前轴承用钢的典型钢种,前者用量最大,后者主要用于大型、特大型或有效厚度较大的轴承,用量次之	GB/T18254 高碳铬轴承钢 GB/T18579 高碳铬轴承钢丝 军甲-61 军用甲组轴承铬钢技术条件 YB4107 航空发动机用高碳铬轴承钢 JB/T1255 高碳铬轴承钢滚动轴承零件热处理技术条件 GJB269A 航空滚动轴承技术条件
渗碳轴承用钢	渗碳轴承钢用于制造要求表面具有高耐磨性、高抗疲劳性、心部具有高强韧性,承受高冲击载荷的轴承。常用牌号为 15Mn、20、20CrMo、20CrNiMo、20CrNi2Mo、10CrNi3M、20Cr2Mn2Mo、20Cr2Ni4 等	GB3203 渗碳轴承钢技术条件 GB699 优质碳素结构钢 JB/T8881 滚动轴承零件 渗碳热处理技术条件 JB/T8882 滚动轴承零件深层渗碳热处理质量标准 JB/T7363 滚动轴承零件碳氮共渗热处理技术条件
中碳合金轴承用钢	主要用于承受冲击载荷条件的轴承。常用牌号为 45、50CrNiA、55SiMoV、65Mn 等	GB3077 合金结构钢技术条件 GB1222 弹簧钢 JB/T6366 55SiMoVA 钢滚动轴承零件热处理技术条件 JB/T8566 滚动轴承零件 碳钢球轴承套圈热处理技术条件 JB/T8569 碳钢球轴承套圈热处理技术条件 JB/T8569 滚动轴承零件 碳钢球渗碳热处理技术条件
耐腐蚀轴承用钢	一般采用不锈钢,常用牌号为 06Cr18Ni9、17Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti 和 12Cr13~40Cr13、95Cr18、102Cr17Mo 以及 14Cr17Ni2、05Cr17Ni4Cu4Nb 等	GB3086 高碳铬不锈钢轴承钢技术条件 GB1220 不锈钢棒 GB4240 不锈钢丝 JB/T1460 高碳铬不锈钢滚动轴承零件热处理技术条件 ZJB36003 工具热处理金相检验标准(参考标准)
耐高温轴承用钢	用于制造在一定高温条件下,具备一定硬度、耐磨性、耐疲劳、抗氧化、耐腐蚀、抗冲击、良好的加工性能和尺寸稳定性的轴承。常用牌号为 Cr4Mo4V、Cr14Mo4V、W6Mo5Cr4V2、W18Cr4V 等	GB9943 高速工具钢棒技术条件 GB1221 耐热钢棒 JB/T2850 Cr4Mo4V 高温轴承钢滚动轴承零件热处理技术条件 ZJB36003 工具热处理金相检验标准(参考标准)
防磁轴承用钢	磁导率 $\mu < 0.1$ H/m 的材料,常用牌号为 17Cr18Ni9、70Mn18Cr4V2WMoN、70Mn15Cr2Al3WMoN、75Mn15Cr2Al3V、25SiMnCr18Ni10WNbN、QBe2.0、NiCu28-2.5-1 等	YS/T334—1995 铍青铜棒 目前尚无热处理国家标准,硬度要求可由生产厂家或用户直接制定,铍青铜可增加晶粒度考核指标,一般为 0.0015~0.0045 mm

#### (五) 滚动轴承钢的常规热处理

##### 1. 滚动轴承钢的退火

退火的目的是改善钢的组织,获得均匀分布的细粒状的珠光体及得到较优的机加工性能,为最终热处理作组织准备。常用轴承钢退火工艺参数选择见表 7-99。

##### 2. 滚动轴承零件的最终热处理

1) 滚动轴承零件的最终热处理 工艺曲线见图 7-86。

表 7-99 常用轴承钢退火工艺参数

钢 种	低温退火		高温退火		等 温 退 火			
	加热温度 $T_1$ (°C)	保温时间 (h)	加热温度 $T_2$ (°C)	保温时间 (h)	第一段 加热温度 $T_3$ (°C)	保温时间 (h)	第二段 加热温度 $T_4$ (°C)	保温时间 (h)
GCr15	650~680	3~5	780~810	3~6	780~810	3~6	680~720	4~6
GCr15SiMn	650~680	3~5	780~800	3~6	780~800	3~6	680~720	4~6
50CrNiA			820~850	3~5				
55SiMoV			700~750	4~6				
95Cr18, 102Cr17Mo	700~780	4~6	850~870	3~6	850~870	3~6	720~730	3~6
12~40Cr13	700~780	2~6	840~900	2~4				
14Cr17Ni2	760~780	2~6	850~880	2~4				
Cr4Mo4V	680~750	4~8	820~860	4~6	820~860	4~6	710~730	4~6
Cr14Mo4V	680~750	4~8			840~900	4~8	730~750	4~8
W6Mo5Cr4V2, W18Cr4V	720~760	4~8			830~850	3~4	720~750	4~6

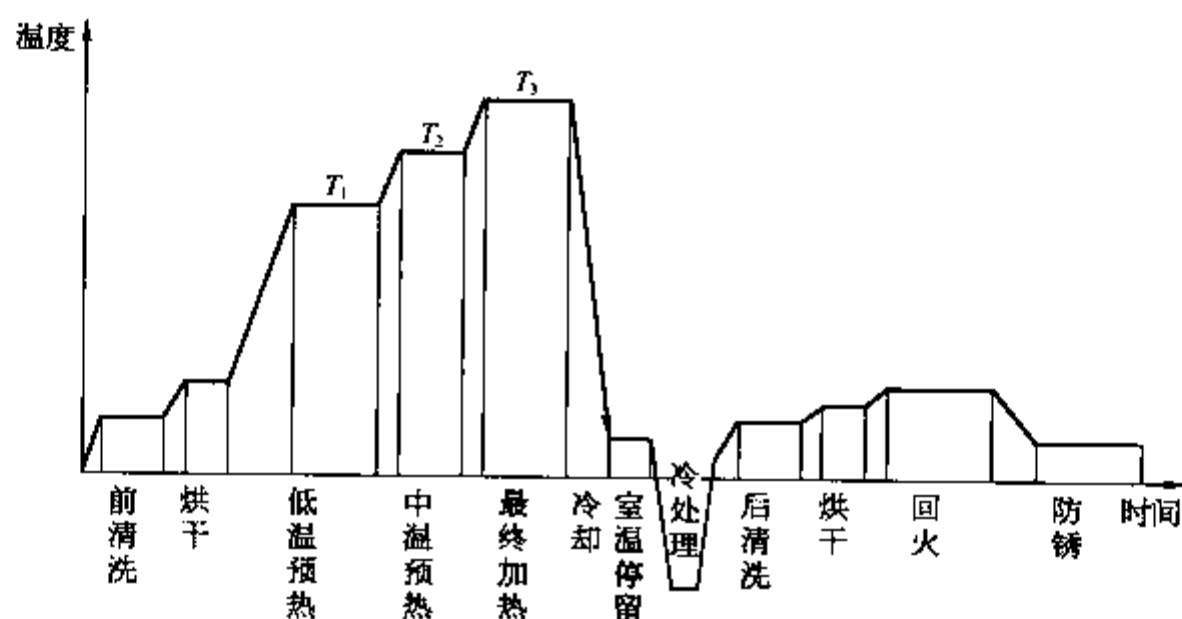


图 7-86 典型热处理工艺曲线

## 2) 热处理的相关工序说明

(1) 前清洗。目的是清除零件表面的垃圾、油污、残余防锈剂,使待淬火套圈或滚动体以非常洁净的状态进入淬火加热炉。该工序对于精密和超精密微型轴承零件、带防尘槽或密封槽的轴承套圈、需真空炉淬火或化学热处理的轴承零件尤为重要。清洗可以在有机溶剂、工业洗洁剂、碱性溶液等介质中进行。对要求更高者可以附加超声波清洗和采用专用真空清洗机进行清洗。

(2) 烘干。温度一般可选用 150~250°C。

(3) 淬火加热。

① 预热。根据零件的冷加工应力、易变形程度,以及合金元素的含量,选择在再结晶温度附近的低温预热,或在相变点温度附近的中温预热。对于不易变形和后加工余量较大的零件(如滚珠、滚柱等),可取消预热或减少预热段数。

② 加热温度。对于退火组织中碳化物颗粒较细或碳化物均匀性较差的零件、采用真空炉淬火的零件、薄壁或易变形的零件、要求残留奥氏体量较低的零件,或使用冷却性能较好的冷却介质和冷却装置时,可选择较低的淬火温度;对于退火组织中碳化物颗粒较粗的零件、厚壁或大尺寸的零件、不易淬火畸变的零件、用感应加热淬火的零件等,可选择较高的淬火温度。

常用轴承材料淬火(固溶)加热温度见表7-100。不同规格尺寸及不同轴承零件的推荐加热温度见表7-101。

表7-100 常用材料淬火(固溶)加热温度

钢 种	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)	$T_3$ (°C)
GCr15	650~680	720~750	825~860
GCr15SiMn	650~680	720~750	820~845
50CrNiA			820~850
55SiMoV			870~880
06Cr18Ni9、17Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti			1 080~1 100
95Cr18、102Cr17Mo	650~680	830~850	1 050~1 100
12Cr13~40Cr13	650~680	830~850	1 000~1 050
14Cr17Ni2	650~680	830~850	950~980
05Cr17Ni4Cu4Nb	650~680	830~850	1 040~1 050
Cr4Mo4V	830~850	1 000~1 020	1 080~1 130
Cr14Mo4V	830~850	1 000~1 020	1 100~1 130
W6Mo5Cr4V2	830~850	1 050~1 100	1 240~1 260
W18Cr4V	830~850	1 050~1 100	1 250~1 270
25SiMnCr18Ni10WNBn	830~850	1 000~1 020	1 140~1 160
70Mn18Cr4V2WMoN			1 130~1 150
70Mn15Cr2Al3WMoN			1 160~1 180
75Mn15Cr2Al3V			1 140~1 160
镀青铜			760~780

表7-101 不同规格尺寸及不同轴承零件的推荐加热温度

零件名称	零件直径(mm)	钢 号	加热温度(°C)
套 圈	2~20	GCr15	830~850
	20~35	GCr15	830~850
	35~150	GCr15	840~860
	150~300	GCr15SiMn	820~840
	300~600	GCr15SiMn	820~840
	600~1 800	GCr20SiMn	820~840
滚 子	1.5~5	GCr15	840~860
	5~15	GCr15	840~860
	15~23	GCr15	840~860
	23~30	GCr15SiMn	820~840
	30~55	GCr15SiMn	830~850
	55~70	GCr20SiMn	830~850

(续表)

零件名称	零件直径(mm)	钢号	加热温度(°C)
钢球	0.75~1.5	GCr15	830~850
	1.5~3	GCr15	830~850
	3~14	GCr15	840~860
	14~50	GCr15	840~860
	50~75	GCr15	840~860

## (4) 淬火冷却。

① 马氏体淬火(或固溶)。淬火转移及冷却时间(通常用冷却至约 315°C 的时间及冷却至约 190°C 的时间表示)见表 7-102。

表 7-102 淬火转移及冷却时间

钢种	淬火转移时间(s)	冷却至约 315°C 的时间(s)	冷却至约 190°C 的时间(min)
GCr15、GCr15SiMn 和其他中、低合金钢	≤5~10	≤10	≤1
马氏体、半马氏体、沉淀硬化不锈钢	≤5~15	≤15	≤2

淬火介质的温度,如采用油冷却,一般油温适当高些(60~80°C)。碳钢、奥氏体不锈钢、70Mn18Cr4V2WMoN、70Mn15Cr2Al3WMoN、75Mn15Cr2Al3V、25SiMnCr18Ni10WNbN 和铍青铜等,采用水或有机聚合物水溶液淬火,保证淬火转移时间 5~10 s。铍青铜淬火介质温度必须 ≤30°C。Cr4Mo4V 和高速钢类高碳高合金材料,须采用真空气淬或加压气淬。轴承零件常用淬火冷却方式与方法见表 7-103。

表 7-103 轴承零件常用淬火冷却方式与方法

零件名称	直径、壁厚(mm)	淬火冷却的方式与方法	淬火介质温度(°C)
滚动体	大中小型滚子和球	自动摇筐、滚筒、溜球料板和振动导板等	油: 30~60 水溶液: 20~40
中小型套圈	<200	手穿、自动摇筐,强力搅动油冷却,喷油冷却,振动淬火等	油: 30~60
大型套圈	200~400	手穿式旋转、淬火机和吊架穿动,同时喷油冷却	油: 30~60
特大型套圈和滚子	>1 000 薄壁套圈 φ40~1 000 套圈滚子	吊架机动冷却,吹气搅油、旋转淬火机冷却,同时吹气冷却	油温 <70
薄壁套圈	<8	在热油中冷却后,即放入低温油中冷却	热油: 130~170 低温油: 30~80
超轻、特轻套圈	—	先在高温油中冷至油温后,放入压模中冷至 30~40°C 时脱模或将加热与保温的套圈直接放入压模中进行油冷	低温油: 30~60

② 贝氏体淬火冷却。高碳铬轴承钢下贝氏体淬火工艺是将零件快速淬入 230~240°C 硝盐槽后,等温 4~6 h。轴承零件经下贝氏体淬火后,冲击韧度、断裂韧性、耐磨工艺性、尺寸稳定性、硬度均匀性都较好,而且零件表面为残留压应力,还可减少磨削裂纹和提高轴承的使用寿命,该工艺已广泛用于铁路客车、货车轮毂专用轴承等频繁承受较大冲击载荷轴承的热处理。

## (5) 冷处理及水冷处理。

① -80~-60°C 冷处理。GCr15、ZGCr15、GCr15SiMn、ZGCr15SiMn 钢制 4 级(C 级)或 4 级以上的轴承零件、



95Cr18 或 102Cr17Mo 钢制轴承零件,淬火后均需进行 $-60\sim-80^{\circ}\text{C}$ 的冷处理,用于航空、航天 5 级(D 级)或 5 级以上的轴承零件、Cr4Mo4V 钢制轴承零件,以及其他对残留奥氏体含量有要求的轴承零件,同样需要进行冷处理。

冷处理与淬火之间的时间间隔一般小于 30 min,冷处理时间一般为 60~120 min。

②  $5\sim 15^{\circ}\text{C}$  水冷处理。该方法适用于对残留奥氏体含量有要求但要求不高的中、小型轴承的大批量生产。铬轴承钢采用此法后,残留奥氏体含量可减少 2%~4%,轴承使用寿命将显著提高。

(6) 后清洗。方法同前清洗,如采用油回火,该工序应在回火之后进行。采用真空气淬或加压气淬时,可取消后清洗工序。

(7) 回火(时效)。淬火、冷处理结束后,应尽快进行回火,对于高速钢之类高碳高合金钢,淬火一回火时间间隔应 $\leq 1$  h。

① 回火(时效)温度。绝大多数滚动轴承零件的回火温度均由国家标准具体规定。从降低残留奥氏体含量角度来讲,应尽可能提高回火温度。对于高碳铬轴承钢,当回火温度 $\leq 170^{\circ}\text{C}$ 时,残留奥氏体含量一般 $\leq 8\%\sim 15\%$ ;回火温度达到 $200^{\circ}\text{C}$ 时,残留奥氏体含量一般 $\leq 6\%\sim 8\%$ ;回火温度达到 $225^{\circ}\text{C}$ 时,残留奥氏体含量一般 $\leq 5\%$ 。其他常见轴承材料回火(时效)温度见表 7-104。

表 7-104 其他常用轴承材料回火(时效)温度

材 料	回火(时效)温度( $^{\circ}\text{C}$ )	备 注
14Cr17Ni2	300	硬度 $\geq 35$ HRC
05Cr17Ni4Cu4Nb	480	硬度 $\geq 40$ HRC
Cr4Mo4V	540~550	回火 2~3 次
Cr14Mo4V	500~520	回火 2~3 次
高速钢	560~570	回火 2~3 次
70Mn18Cr4V2WMoN	650	回火保温 40 h
25SiMnCr18Ni10WNbN	750	回火保温 15~20 h
铍青铜	310~320	

注:时效温度一般比回火温度低 20~30 $^{\circ}\text{C}$ 。

② 回火(时效)时间。一般低温回火为 2~3 h,要求降低残留奥氏体含量时,回火时间可延长至 4~8 h;中温回火为 1.5~2.5 h;高温回火为 1~2 h。

时效:高精度轴承零件进行时效(稳定化处理),一般为 4~8 h,更高要求的需 8~12 h。铍青铜需防止过时效现象,必须严格控制时效时间,以零件硬度 $\geq 34\sim 38$  HRC 的时效时间为宜。

(8) 防锈。热处理工序结束后,必须马上进行防锈处理,常用 SD-2 型防锈剂或 5%~10% NaNO<sub>2</sub> + 0.5%~1% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (pH 值控制在 10 左右)水溶液。

3) 轴承零件常见淬、回火缺陷及补救办法 见表 7-105。

表 7-105 轴承零件因淬、回火时处置不当而造成的缺陷及补救办法

缺陷名称	产生原因	补救办法
表面组织合格,心部有托氏体或整体因有托氏体、索氏体而硬度不足	1) 冷却介质冷却能力不足 2) 冷却装置冷却能力不足	1) 选用合适的冷却介质 2) 加强冷却装置的冷却能力 3) 减少单位时间内进入冷却装置的零件数量
心部组织合格,表面有托氏体或硬度偏低	淬火转移时间偏长	缩短淬火转移时间
表面软点 (硬度低 2~3 HRC)	1) 冷却介质配置不当 2) 冷却介质温度太高 3) 水剂冷却介质表面有油	1) 重新配置冷却介质 2) 使冷却介质温度 $\leq 35^{\circ}\text{C}$ 3) 除油

(续表)

缺陷名称	产生原因	补救办法
变形超差	1) 未预热 2) 加料不规范 3) 冷却介质变质或温度太低	1) 增加预热工序 2) 规范加料方式 3) 重新配置或更换冷却介质 4) 适当提高冷却介质温度
开裂	1) 加热温度偏高或加热时间偏长 2) 淬火油中水分超过 0.25% 3) 返工时未经中间退火 4) 未及时回火	采取针对性措施
贫脱碳超差	1) 炉子漏气 2) 保护气氛中途断气 3) 工件表面有锈蚀或清洗不干净	采取针对性措施
回火稳定性不合格	1) 回火时间不够 2) 回火炉炉温均匀性不合格	1) 延长保温时间, 补充回火 2) 强化对流, 改善回火炉炉温均匀性

### (六) 轴承零件的表面热处理

轴承零件的表面热处理方法有多种。

(1) 轴承行业常用工频和中频感应淬火, 该方法较适合于大批量、少品种热处理自动线和重大型轴承套圈的热处理。

(2) 轴承零件的化学热处理, 包括广泛用于铁路、汽车、飞机行业和重大型、特大型轴承的渗碳; 应用于奥氏体不锈钢、低碳马氏体不锈钢的渗氮; 广泛应用于滚针其他轴承的碳氮共渗工艺。一般大批量生产, 渗层较薄时选用网(履)带炉, 渗层较厚时采用箱式多用炉。

(3) 轴承行业常用的其他表面改性技术主要有两大类。第一类是以增加表面强度为主要目的的物理气相沉积、化学气相沉积、离子注入等技术, 在轴承工作表面形成不同的硬质层, 达到提高运转速度, 延长使用寿命等目的。第二类是以改变表面润滑性能为主要目的的物理气相沉积等技术, 在轴承工作表面形成各类减摩层或自润滑层, 满足在高温、高真空、超高速等情况下运行的要求。

## 第七节 铍青铜弹性件热处理

铍青铜是典型的固溶处理—时效(脱溶)强化合金, 被广泛用于机械、仪表、化工、石油勘探、宇航、航空等行业, 用于制作轴瓦、耐磨件、弹簧和其他弹性元件等; 具有高强度、高硬度、耐磨、耐蚀、抗疲劳、导电导热性好及撞击不产生火花等特性; 固溶时效强化效果好, 但应注意铍昂贵且有毒, 在生产中还存在脆断、硬度不足、弹性滞后等许多问题。

### 一、固溶处理

铍青铜固溶处理的加热, 通常在通氨分解气等保护气炉或真空炉中进行, 固溶处理温度和时效温度见表 7-106。固溶处理保温时间见表 7-107。铍青铜固溶处理冷却时应迅速转入水中(水温一般不超过 25℃), 转移时间一般不超过 6 s。因时效过程进行较快, 时效保温时间不宜太长, 时间一般为 2~4 h。

表 7-106 各种铍青铜固溶处理温度和时效温度

合金成分与代号	固溶处理(℃)	时效温度(℃)
Cu+Be1.9-2.2+Ni0.2-0.5 (QBe2)	780~800	300~330
Cu+Be2-2.5+(Ni<0.4) (特殊要求 QBe2.15, QBe2.3, QBe2.5)	780~800	300~345
Cu+Be1.85-2.1+Ni0.2-0.4+Ti0.1-0.25 (QBe1.9)	780~800	320~330

(续表)

合金成分与代号	固溶处理(°C)	时效温度(°C)
Cu+Be1.6-1.85+Ni0.2-0.4+Ti0.1-0.25 (QBe1.7)	780~800	320~330
Cu+Be1.9-2.15+Co0.25-0.35	785~790	305~325
Cu+Be1.6-1.8+Co0.25-0.35	785~790	305~325
Cu+Be2-2.5+Co0.35-0.45+Fe0.07-0.11	800~820	295~315
Cu+Be1.85-2.1+Ni0.2-0.4+Ti0.1-0.25+Mg0.07-0.13 (QBe1.7-0.1)	780~800	300~350

表 7-107 铍青铜固溶处理的保温时间

材料厚度(mm)	保温时间(min)	材料厚度(mm)	保温时间(min)
<0.13	2~6	0.25~0.76	6~10
0.11~0.25	3~9	0.76~2.30	10~30

以 QBe2 为例,最佳的固溶处理温度是 780~820°C。不同温度固溶处理并经 280°C 2 h 时效后的晶粒度、硬度和弯曲试验见表 7-108。

表 7-108 QBe2Φ0.8 mm 丝经不同温度固溶处理,280°C 2 h 时效后的晶粒度、硬度和弯曲性能

固溶温度	760°C	780°C	800°C	820°C	840°C	860°C	780°C <sup>①</sup>
晶粒度(mm)	0.01	0.013	0.015	0.015~0.02	0.025~0.035	≥0.055	0.013
固溶后硬度(HV0.1)	172	170	134.3	139	142.2	146	125.6
时效后硬度(HV0.1)	377	381	390	387	398	394	396
时效后 180°弯曲试验	不断	不断	不断	不断	断裂	90°断裂	不断

注:① 固溶处理保温 20 min,其余 8 min。

## 二、时效(脱溶)处理

铍青铜固溶处理后  $\alpha$  相成为  $\alpha$  过饱和固溶体(下称  $\alpha_{\text{过}}$ ),经时效后在  $\alpha_{\text{过}}$  相中析出富有合金元素的 G·P 区,成为  $\alpha(\gamma')$  相使硬度提高,同时还会在  $\alpha(\gamma')$  的晶界上析出硬度低的相  $\gamma_1$ ,较大幅度地降低铍青铜的硬度和强度,增加铍青铜的弹性滞后现象。铍青铜固溶处理后的最佳时效温度一般在 320~340°C 范围。

以 QBe2.5 为例,经 780°C 固溶处理,不同温度 2 h 时效后的硬度、 $\gamma_1$  相析出量及  $\gamma_1$  和  $\beta$  相的硬度值见表 7-109。

表 7-109 QBe2.5 780°C 固溶处理后各种温度 2 h 时效后硬度、 $\gamma_1$  相析出量、 $\gamma_1$ 、 $\beta$  相硬度数据

工艺名称	固溶处理	欠时效			峰值时效			过时效		
试验项目										
时效温度(°C)	780°C 淬水	260	280	300	320	340	360	380	400	420
硬度(HV1)	172.3	321.3	364.6	389	401	413	339	285	271.3	249
晶界析出物( $\gamma_1$ )析出量	—	—	—	1.7	8.6	13.9	74.6	—	82.1	87.4
$\gamma_1$ 相硬度(HV0.01)	—	—	—	—	—	276.3	248.5	—	247.3	244.9
时效后 $\beta$ 相硬度(HV0.01)	302.2	440.5	486.9	504.9	527.7	577.2	314.4	—	270.5	255.8



## 第一节 常用力学性能试验

力学性能是指在力或能的作用下,材料所表现出来的一系列力学特性。其中主要是强度、刚性、弹性、塑性、韧性以及其他特殊性能。在工厂实验室,通常也把部分工艺性能试验列入力学性能试验的范畴。现行国家标准规定的力学性能名称、符号和旧版的力学性能名称符号的对照见附录一。

### 一、力学性能试验的取样及制作

金属材料力学性能中的各项测试结果不仅与其本身特性有关,还与取样部位、试验形状、尺寸等有关。因此,在进行力学性能试验时,试样的取样位置和制备方法应按有关通用的国家或行业标准等规定选用。下面是几种国内常用的力学试验取样与制样方法。

#### 1. 钢及钢产品力学性能试验取样方法

GB/T2975《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》规定了条钢、钢板和钢管的力学性能试验取样位置和试样制备要求。经供需双方协商后,此标准也可用于其他金属产品的取样。取样的一般要求:

- (1) 应在外观及尺寸合格的钢产品上取样。样料应有足够的尺寸以保证机加工后获得足够的试样。
- (2) 取样时,应对抽样产品、样料、样坯和试样作出标记,以保证始终能识别取样的位置及方向。
- (3) 取样及制备试样时,应防止过热、加工硬化而影响力学性能。
- (4) 取样的方向应由产品标准或供需双方协议规定。
- (5) 样料的状态分为交货状态和标准状态,样坯的热处理应按相关要求进行。
- (6) 条钢、钢板及钢管的拉伸、冲击和弯曲试验取样位置按 GB/T2975 执行。

#### 2. 铝合金材料拉伸试样的取样方法

1) 铸造铝合金拉伸试样的取样 按照 GB/T1173《铸造铝合金技术条件》规定,一般用单铸试样,其直径为  $(12 \pm 0.25)$  mm,标距为直径的 5 倍。

单铸试样的热处理必须与同炉浇注铸件同炉处理。单铸试样可带铸皮进行试验,也可车削去铸皮后进行,此时试样直径为  $(10 \pm 0.1)$  mm。

铸造铝合金也可在同炉铸件上切取得本体试样,试样直径不小于 6 mm。

2) 压铸铝合金拉伸试样的取样 按 GB/T13822《压铸有色合金试样》规定,压铸铝合金拉伸试样在专用压铸型内压铸。A 型试样为圆形试样,B 型试样为矩形试样。

### 二、金属拉伸试验

金属拉伸试验分为室温拉伸试验和高温拉伸试验。金属室温拉伸试验在热处理质量检测中应用最广泛。现行的国家标准为 GB/T228《金属材料 室温拉伸试验方法》。

#### 1. 室温拉伸试验条件

常温拉伸试验应在  $10 \sim 35$  °C 温度范围内进行,除有关标准或协议另有规定外。拉伸试验时,在弹性范围和直至规定延伸强度完成,试验机夹头的分离速率应尽可能保持恒定并在表 8-1 规定的应力速率范围内。

抗拉强度测定,试验速率控制在试样平行长度的应变速率不超过 0.008/s。

表 8-1 应力速率范围

材料弹性模量 $E(\text{N/mm}^2)$	应力速率 $[(\text{N/mm}^2)/\text{s}]$	
	最小	最大
$<150\,000$	2	20
$\geq 150\,000$	6	60

## 2. 室温拉伸试验的试样

根据试样应力截面积的形状,试样可分为圆形、矩形、弧形和环形截面积试样等。如样坯是具有恒定横截面的产品(型材、棒材、线材等),可不经机加工,保留原始截面形状进行试验。拉伸试样的符号、说明见表 8-2。

试样的原始标距  $L_0$  与横截面积  $S_0$  的相互关系直接影响试样的测定结果。当试样的  $L_0 = k\sqrt{S_0}$  时,称为比例试样,无此关系的称为定标距试样。对于比例试样又分为两种:

表 8-2 拉伸试样的符号、说明

符 号	说 明	单 位
$L_t$	试样总长度	mm
$L_0$	试样原始标距	
$L_c$	平行长度	
$d$	圆形横截面试样平行长度的直径或圆丝直径	
$a$	矩形横截面试样厚度或管壁厚度	
$b$	矩形横截面试样平行长度的宽度或管的纵向剖条宽度或扁丝宽度	
$S_0$	原始横截面积	$\text{mm}^2$
$r$	过渡弧半径	mm

短比例试样(常用):  $k = 5.65$  (对圆截面试样即  $L_0 = 5d_0$ );

长比例试样:  $k = 11.3$  (对圆截面试样即  $L_0 = 10d_0$ );

也允许按产品标准或双方协议采用  $L_0 = 4d_0$  或  $L_0 = 8d_0$  (圆截面)的试样。定标距试样的  $L_0$  和  $L_t$  应按有关标准或协议规定执行。

各国对  $k$  值有不同规定,只有当  $k$  值相同时,测得的伸长率才能比较。若  $k$  值不同,只能通过由大量实验得到的换算系数作近似比较。机加工的圆形、矩形横截面比例试样如图 8-1,尺寸见表 8-3、表 8-4。对管材试样,如试验机能力允许,应采用全截面的试样进行试验,否则应取纵向弧形试样,机加工的弧形横截面比例试样如图 8-2,试样尺寸参照表 8-4。

表 8-3 圆形拉伸试样横截面比例试样尺寸

$d(\text{mm})$	$r(\text{mm})$	$k = 5.65$			$k = 11.3$		
		$L_0(\text{mm})$	$L_c(\text{mm})$		$L_0(\text{mm})$	$L_c(\text{mm})$	
			常 用	仲裁试验		常 用	仲裁试验
25	$\geq 20$	125	$\geq 140$	175	250	$\geq 265$	300
20	$\geq 15$	100	$\geq 110$	140	200	$\geq 210$	240
15	$\geq 12$	75	$\geq 70$	90	150	$\geq 160$	190
10	$\geq 8$	50	$\geq 55$	70	100	$\geq 105$	120
8	$\geq 6$	40	$\geq 45$	56	80	$\geq 85$	96
6	$\geq 5$	30	$\geq 35$	42	60	$\geq 65$	72
5	$\geq 4$	25	$\geq 30$	35	50	$\geq 55$	60
3	$\geq 3$	15	$\geq 17$	21	30	$\geq 32$	36

注: 1. 如相关产品标准无具体规定,  $d$  优先采用 20 mm、10 mm 或 5 mm。

2. 试样总长度取决于夹持方法,原则上  $L_t > L_c + 4d$ 。

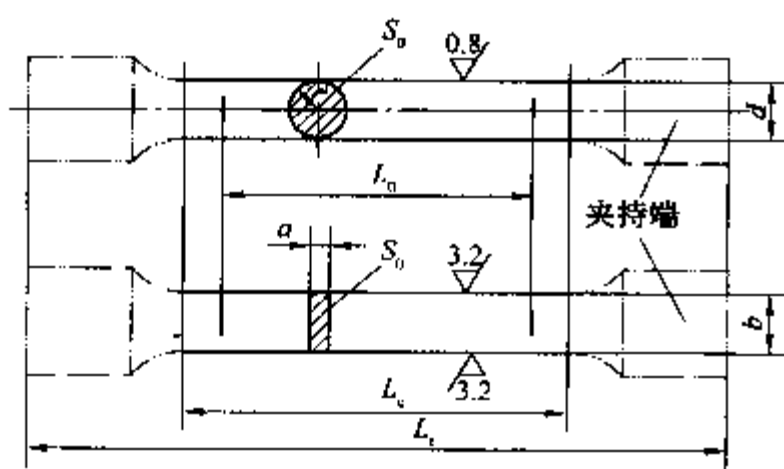


图 8-1 机加工的圆形、矩形横截面比例试样

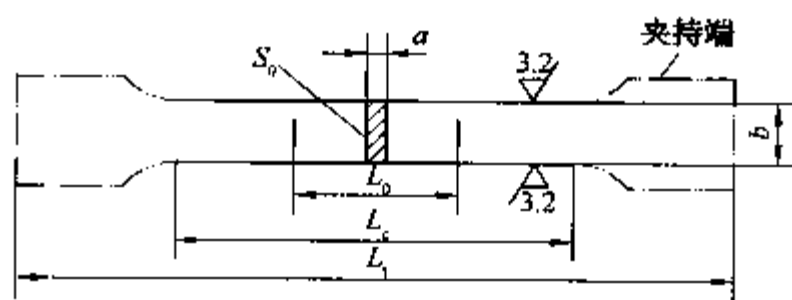


图 8-2 机加工的弧形横截面比例试样

表 8-4 矩形拉伸试样横截面比例试样尺寸

b(mm)	a(mm)	k = 5.65		k = 11.3	
		$L_0$ (mm)	$L_c$ (mm)	$L_0$ (mm)	$L_c$ (mm)
12.5	≥12	$5.65\sqrt{S_0}$	常用 $\geq L_0 + 1.5\sqrt{S_0}$ 仲裁试验: $L_0 + 2\sqrt{S_0}$	$11.3\sqrt{S_0}$	常用 $\geq L_0 + 1.5\sqrt{S_0}$ 仲裁试验: $L_0 + 2\sqrt{S_0}$
15					
20					
25					
30					

注: 如相关产品标准无具体规定, 优先采用比例系数  $k = 5.65$  的比例试样。

表 8-3、表 8-4 适用于厚度等于或大于 3 mm 的板材和扁材以及直径或厚度等于或大于 4 mm 的线材、棒材和型材使用的试样类型。其他有关非比例试样的常用尺寸及薄板和薄带采用的试样类型, 可查阅 GB/T228 标准后附录 A~D 的相应内容。

### 3. 金属室温拉伸试验中力学性能指标的测定

在金属拉伸实验中, 常测的力学性能指标有: 拉伸杨氏模量、屈服强度、规定非比例延伸强度、抗拉强度、断后伸长率、断面收缩率等。不同的金属材料, 应根据需要测定相应指标。

1) 拉伸杨氏模量的测定(GB/T8653) 在拉伸试验中, 轴向拉伸应力与轴向拉伸应变成线性比例范围内的轴向拉伸应力与轴向拉伸应变之比称杨氏模量( $E_t$ )。

$$E_t = \left( \frac{\Delta F}{S_0} \right) / \left( \frac{\Delta L}{L_d} \right)$$

- 式中  $\Delta F$ ——轴向力的增量(N);  
 $\Delta L$ ——轴向变形的增量(mm);  
 $S_0$ ——试样平行长度部分的原始横截面积(mm<sup>2</sup>);  
 $L_d$ ——轴向引伸计标距(mm)。

试验时, 用自动记录方法绘制轴向力  $F$ —轴向变形量  $\Delta L_d$  曲线, 如图 8-3, 确定弹性直线段, 在该直线段上读取相距尽量远的 A、B 两点之间的轴向力增量和相应的轴向变形增量, 按公式计算杨氏模量。

2) 屈服强度的测定(GB/T228) 金属材料在拉伸试验时产生的屈服现象是开始产生宏观塑性变形的一种标志。呈现明显屈服(不连续屈服)现象的金属材料, 相

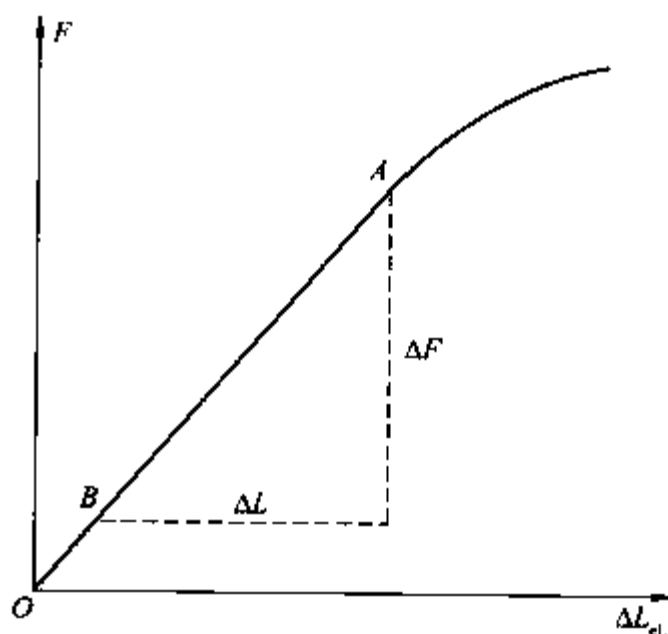


图 8-3 轴向力—轴向变形量曲线

关材料标准应规定测定上屈服强度或下屈服强度,如未具体规定,一般测定下屈服强度。

在拉伸试验过程中,若出现明显屈服则可见:外力不增加(保持恒定)试样仍能继续伸长,或外力增加到一定数值时突然下降,随后,在外力不增加或上下波动情况下,试样能继续伸长。从力—延伸曲线或力—位移曲线图上读取力首次下降前的最大力和不计初始瞬时效应时屈服阶段中的最小力或屈服平台的恒定力,将其分别除以试样原始横截面积( $S_0$ )得到上屈服强度  $R_{eH}$  或下屈服强度  $R_{eL}$ ,如图 8-4 所示是在应力—延伸率曲线得到的上屈服强度和下屈服强度。

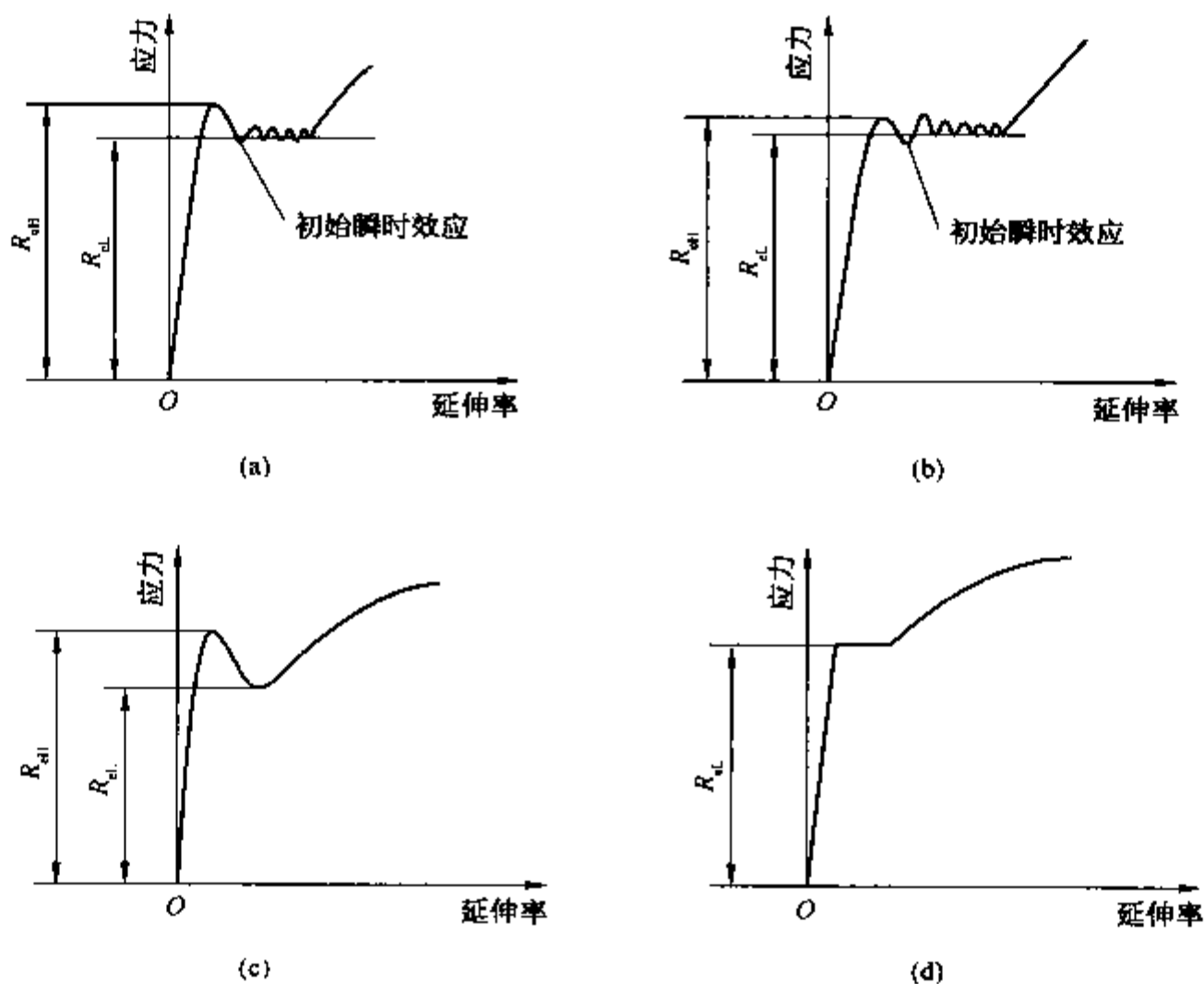


图 8-4 拉伸试验时不同类型曲线的上屈服强度和下屈服强度

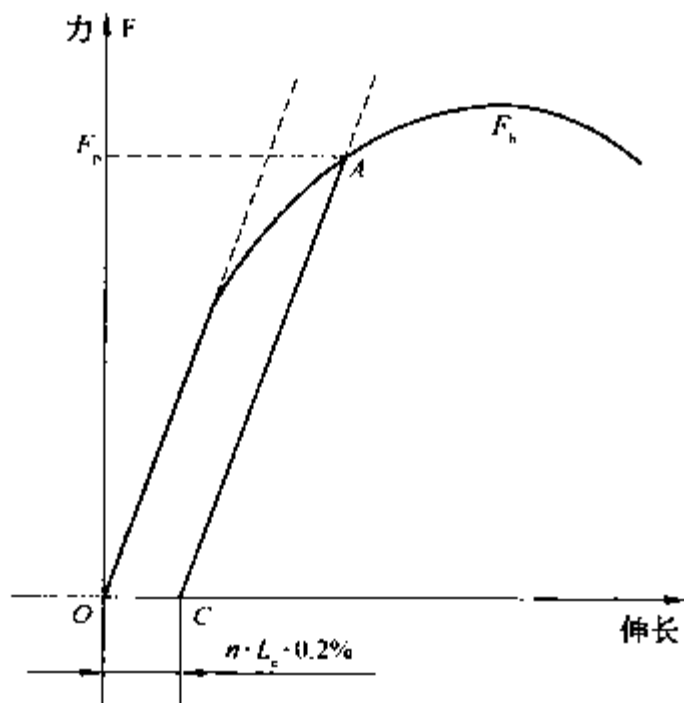


图 8-5 图解法测定  $R_{p0.2}$

3) 规定非比例延伸强度的测定 对于拉伸试验过程中不发生明显屈服现象的材料,在测试中一般采用规定微量塑性延伸应力来代替上屈服强度或下屈服强度,根据测定方法不同,规定微量塑性延伸应力可分为三种指标:  $R_p$ 、 $R_r$  和  $R_t$ 。

$R_p$ ——规定非比例的延伸强度,单位  $N/mm^2$ ;

$R_r$ ——规定残余延伸强度,单位  $N/mm^2$ ;

$R_t$ ——规定总延伸强度,单位  $N/mm^2$ 。

其中应用最广泛的是  $R_{p0.2}$  (表示规定非比例延伸率为 0.2% 时的应力),常用图解法测定。用自动记录方式绘制试样的力—伸长曲线图(图 8-5),在曲线上自弹性直线段与伸长轴交点  $O$  起,截取相应于规定非比例延伸率的  $\overline{OC}$  段,使:

$$\overline{OC} = n \cdot L_c \cdot 0.2\%$$

式中  $n$ ——伸长轴的放大倍数；

$L_e$ ——引伸计标距(mm)。

再过  $C$  点作弹性直线段的平行线  $\overline{CA}$  交曲线于  $A$  点,  $A$  点对应的力  $F_{p0.2}$  (N) 即所测规定非比例为 0.2% 伸长时对应的力, 其应力按下式计算:

$$R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0}$$

式中  $S_0$ ——试样平行长度部分的原始横截面积( $\text{mm}^2$ )。

此外还有卸力法测定规定残余延伸强度  $R_{r0.2}$ , 可查阅 GB/T228。

4) 抗拉强度的测定 将试样一直拉至断裂, 对于呈现明显屈服(不连续屈服)现象的金属材料, 从记录的拉伸曲线图上或从测力度盘, 读取过了屈服阶段之后的最大力  $F_m$  (N); 对于呈现无明显屈服(连续屈服)现象的金属材料, 从记录的拉伸曲线图上或从测力度盘读取试验过程中的最大值  $F_m$  (N)。抗拉强度  $R_m$  按下式计算:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ (N/mm}^2 \text{ 或 MPa)}$$

式中  $S_0$ ——试样平行长度部分的原始横截面积( $\text{mm}^2$ )。

5) 试样断后伸长率的测定 伸长率一般有三类指标: 屈服点延伸率、最大力伸长率及断后伸长率。金属材料一般采用断后伸长率指标, 以符号  $A$  表示, 可按下式计算:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中  $L_u$ ——试样拉断后的标距(mm);

$L_0$ ——试样原始标距(mm)。

由于伸长率不仅与材料性质有关, 还与  $L_0/\sqrt{S_0}$  比值有关, 因此用伸长率符号  $A$  的下标来注明  $L_0/d_0$  的比值( $d_0$ : 试样平行长度部分直径), 金属材料采用  $L_0 = 5d_0$  或  $L_0 = 10d_0$  的试样, 相应测出的伸长率分别标注为  $A$  或  $A_{11.3}$ 。

断后伸长率的测定: 试样拉断后将断裂试样在断裂处紧密对接在一起, 尽量使它们处于同一直线上, 测出断后标距  $L_u$  (如有缝隙, 不必扣除, 计入标距内)。原则上拉断处到最邻近标距端点的距离大于  $\frac{1}{3}L_0$  时测得数据有效, 否则按移位法进行测试, 测试方法可查阅 GB/T228。

具有一定塑性材料的试样, 试样拉断后试样标距的伸长包括均匀塑性变形伸长  $\Delta L_B$  和集中塑性变形  $\Delta L_u$  两部分。 $\Delta L_B$  和  $\Delta L_u$  分别与  $L_0$  和  $\sqrt{S_0}$  有关系式, 即  $\Delta L_B = \beta \cdot L_0$ ,  $\Delta L_u = \gamma \cdot \sqrt{S_0}$ 。 $\beta$  和  $\gamma$  均为常数, 对同一种金属材料经相同加工工艺制成的几何形状相似的拉伸试样均为恒定值。拉伸试样在室温下不同标距断后伸长率之间可进行换算, 参阅有关标准。

6) 试样断面收缩率的测定 断面收缩率  $Z$  是试样拉断后, 缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比, 即:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中  $S_0$ ——试样平行长度部分的原始横截面积( $\text{mm}^2$ );

$S_u$ ——试样断后最小横截面积( $\text{mm}^2$ )。

对于圆形试样, 应在断口的相互垂直的两个方向上测量直径, 取其算术平均值, 然后计算横截面积  $S_u$ 。对于矩形试样,  $S_u$  通常可近似地用断裂后颈缩处最大宽度  $b_u$  乘以最小厚度  $a_u$  求得, 即  $S_u = b_u \cdot a_u$ 。

7) 拉伸试验中力学性能指标的数值修约 试验测定的性能结果数值应按照相关产品标准的要求进行修约。如未规定具体要求, 应按照表 8-6(GB8170) 的要求进行修约。



表 8-5 性能测试结果数值的修约间隔

性 能	范 围	修 约 间 隔
$R_{eH}, R_{eL}, R_p, R_t, R_r, R_m$	$\leq 200 \text{ N/mm}^2$ $> 200 \sim 1\,000 \text{ N/mm}^2$ $> 1\,000 \text{ N/mm}^2$	1 N/mm <sup>2</sup> 5 N/mm <sup>2</sup> 10 N/mm <sup>2</sup>
$A_e$		0.05%
$A, A_g$		0.5%
$Z$		0.5%

### 三、金属弯曲试验

用弯曲载荷对塑性材料进行试验,是为了检验其承受规定弯曲程度的变形能力,并显示材料缺陷,称弯曲试验,如果试样在室温状态下进行,又称冷弯试验。用弯曲载荷对脆性材料进行试验,是为了测定材料的抗弯强度和塑性变形大小,称抗弯试验。

#### 1. 弯曲试验(GB/T232)

弯曲试验是使圆形、方形、矩形或多边形横截面试样在弯曲装置上经受弯曲塑性变形,不改变加力方向,直至达到规定的弯曲角度。

##### 1) 符号、说明 见表 8-6。

表 8-6 弯曲试验符号、说明

符号	说 明	单 位	符号	说 明	单 位
$a$	试样厚度或直径或多边形横截面内切圆直径	mm	$l$	支辊间或翻板间距离	mm
$b$	试样宽度	mm	$d$	弯曲压头或弯曲直径	mm
$L$	试样长度	mm	$\alpha$	弯曲角度	°

#### 2) 试样

(1) 试验使用圆形、方形、矩形或多边形横截面试样。样坯的切取位置和方向应按照相关产品标准要求。如未具体规定,对于铜产品应按照 GB/T2975 的要求。

(2) 试样宽度应按照相关产品标准的要求,如未具体规定,应按表 8-7 取弯曲试样宽度。

(3) 试样厚度或直径应按照相关产品标准的要求,如未具体规定,应按表 8-8 取弯曲试样厚度或直径。

表 8-7 横截面为矩形的弯曲试样宽度

产品宽度(mm)	试样宽度 $b$ (mm)	
$\leq 20$	产品宽度	
$> 20$	厚度 $a < 3$	$20 \pm 5$
	厚度 $a \geq 3$	$20 \sim 50$

表 8-8 板材、带材和型材的弯曲试样厚度或直径

产品厚度(mm)	试样厚度 $a$ (mm)
$\leq 25$	产品厚度或直径
$> 25$	25(保留一侧原表面)

(4) 直径或多边形横截面内切圆直径不大于 50 mm 的产品,其试样横截面应为产品的横截面。如试验设备能力不足,对于直径或多边形横截面内切圆直径大于 50 mm 的产品,应按照图 8-6 将其机加工成横截面内切圆直径不小于 25 mm 的圆形试样。除非另有规定,钢筋类产品均以其全截面进行试验。

(5) 弯曲试验时,试样保留的原表面或试样未加工的原表面应置于受拉面的一侧。

(6) 试样长度应根据试样厚度和所使用的试验设备确定。一般情况下试样长度  $L = 0.5\pi(d + a) + 140 \text{ mm}$ 。

3) 弯曲试验方法 弯曲试验应在  $10 \sim 35^\circ\text{C}$  温度范围内进行,除有关标准或协议另有规定外。

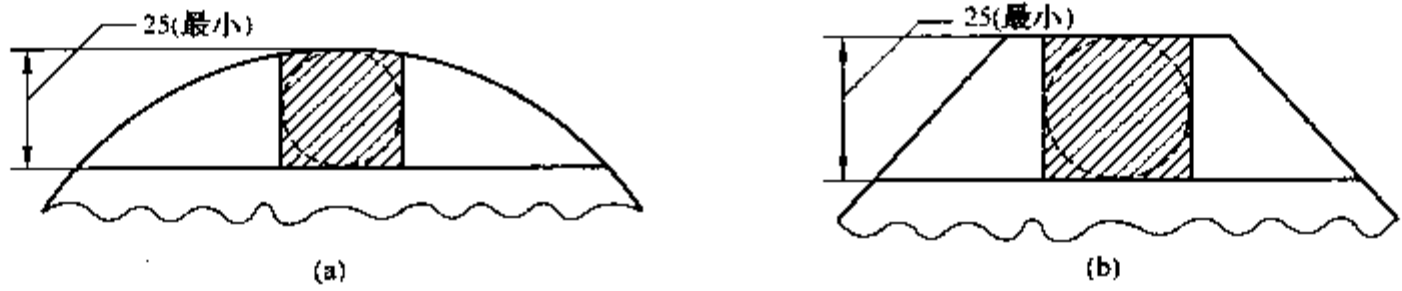


图 8-6 弯曲试样横截面形状与尺寸

一般采用图 8-7~图 8-9 的方法之一完成规定的弯曲角度。然后应按照相关产品标准的要求评定弯曲试验结果。如未规定具体要求,弯曲试验后试样弯曲外表面无肉眼可见裂纹应评为合格。

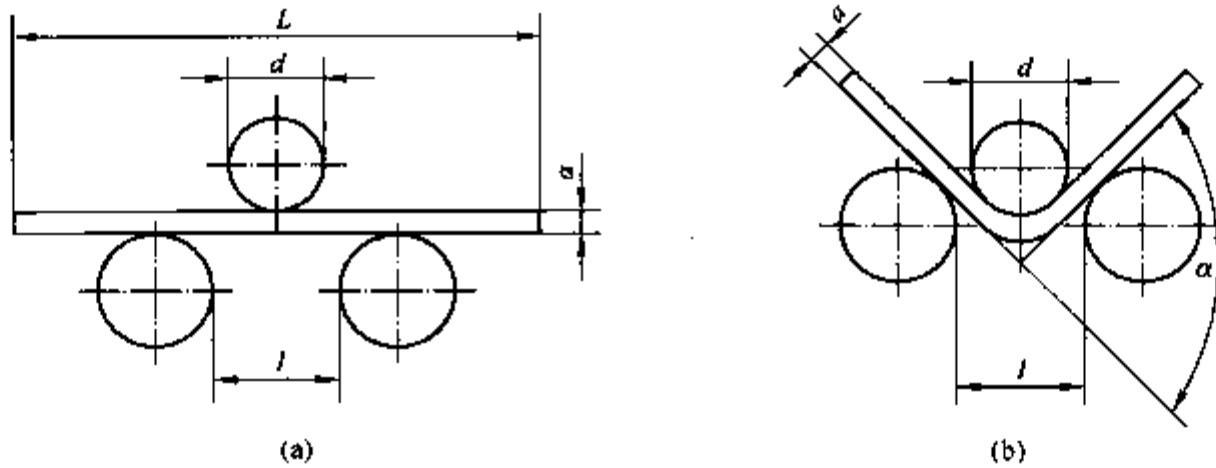


图 8-7 支辊式弯曲装置

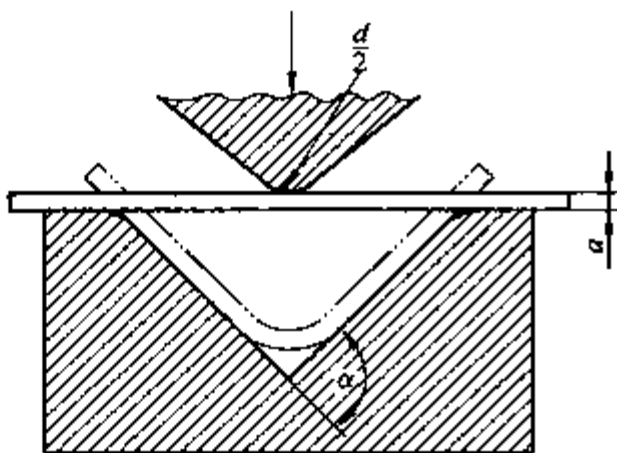


图 8-8 V形模具式弯曲装置

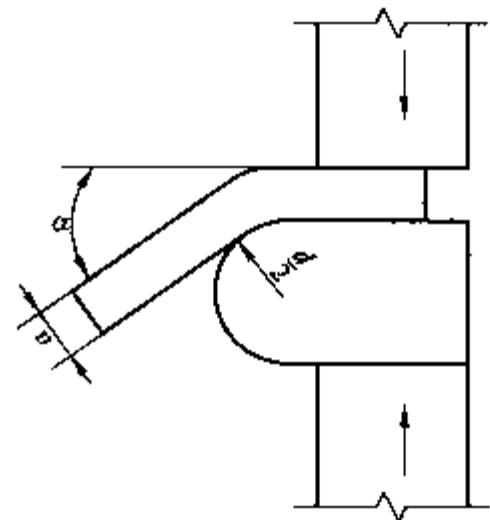


图 8-9 台虎钳式弯曲装置

## 2. 抗弯试验(GB/T14452)

抗弯试验采用三点弯曲或四点弯曲方式(如图 8-10、图 8-11、表 8-9)对圆形或矩形横截面试样施加弯曲力,一般直至断裂,测定其弯曲力学性能。适用于测定脆性断裂和低塑性断裂的金属材料的一项或多项弯曲力学性能。

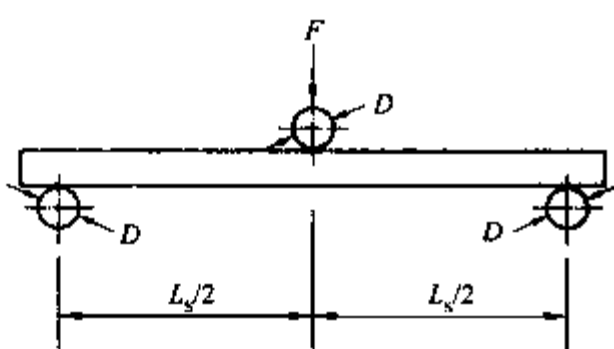


图 8-10 三点弯曲试验示意图

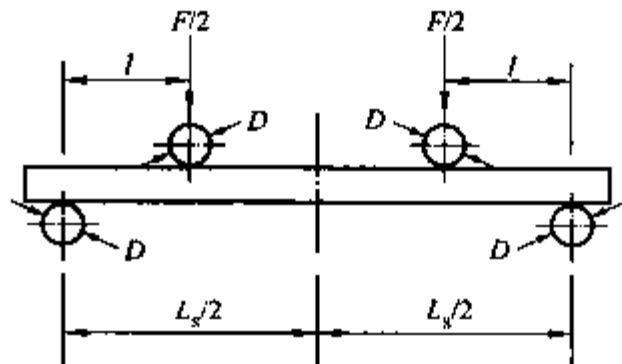


图 8-11 四点弯曲试验示意图

1) 抗弯试验符号、说明 见表 8-9。

表 8-9 抗弯试验符号、说明

符号	名称	单位	符号	名称	单位
$d$	试样直径	mm	$f$	挠度	mm
$b$	试样宽度	mm	$f_{bb}$	断裂挠度	mm
$h$	试样高度	mm	$F$	弯曲力	N
$L$	试样长度	mm	$F_{bb}$	最大弯曲力	N
$L_s$	跨距	mm	$\sigma_{bb}$	抗弯强度	N/mm <sup>2</sup>
$l$	力臂	mm	$W$	试样截面系数	mm <sup>3</sup>

2) 试样 采用圆形横截面试样和矩形横截面试样。试样的形状、尺寸、公差及表面要求应按有关标准和协议的规定。如无规定,一般采用的试样尺寸见表 8-10。

表 8-10 常用抗弯试验的试样尺寸

试样	D(mm)	$h \times b$ (mm)	$L_s$ (mm)	$L$ (mm)
圆形横截面	10		$\geq 160$	$L_s + 20$
	20		$\geq 320$	$L_s + 20$
	30		$\geq 480$	$L_s + 30$
矩形横截面 (硬金属用)		5×5	30	35
		5.25×6.5	14.5	20
矩形横截面		10×10	$\geq 160$	$L_s + 20$
		20×20	$\geq 320$	$L_s + 20$

3) 抗弯强度的测定 将试样根据要求按图 8-10 或图 8-11 对称地安放于弯曲试验装置上,对试样连续施加弯曲力,直至试样断裂。从试验机测力度盘上或从记录的弯曲力—挠度曲线上读取最大弯曲力  $F_{bb}$ ,按公式进行计算:

三点弯曲试验: 
$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb} L_s}{4W} \quad (\text{N/mm}^2)$$

四点弯曲试验: 
$$\sigma_{bb} = \frac{F_{bb} l}{2W} \quad (\text{N/mm}^2)$$

对于圆形横截面试样: 
$$W = \frac{1}{32} \pi d^3 \quad (\text{mm}^3)$$

对于矩形横截面试样: 
$$W = \frac{1}{6} bh^2 \quad (\text{mm}^3)$$

4) 断裂挠度的测定 试样弯曲时,其中性线偏离原始位置的最大距离称挠度  $f$ (mm)。

表 8-11 性能测试结果数值的修约间隔

性能	范围	修约间隔
$\sigma_{bb}$	$\leq 200 \text{ N/mm}^2$	1 N/mm <sup>2</sup>
	$> 200 \sim 1000 \text{ N/mm}^2$	5 N/mm <sup>2</sup>
	$> 1000 \text{ N/mm}^2$	10 N/mm <sup>2</sup>
$f$		0.1 mm

将试样对称地安放于弯曲试验装置上,对试样连续施加弯曲力直至试样断裂,测量试样断裂瞬间跨距中点的挠度,此挠度即为断裂挠度  $f_{bb}$ 。

挠度和断裂挠度可以利用挠度计或试验机横梁位移来测定。

5) 测试结果数值的修约 测试结果的数值应按表 8-11 进行修约,修约的方法按 GB8170 执行。

#### 四、金属冲击试验

国内外通用的冲击试验方法主要有摆锤冲击试验、落锤冲击试验方法和止裂温度试验法等。目前国内倾向于采用摆锤冲击试验方法,现行标准是 GB/T229《金属夏比缺口冲击试验方法》。

##### 1. 冲击试样的制取

由于冲击试验的影响因素较多,因此对取样应有一定要求,尤其是取样的方向性要特别注意。冲击样坯的切取应按产品标准或 GB/T2975 的规定执行。冲击试样的纵向是沿轧制方向截取,并保证试样不存在加工硬化和因烧割而引起组织变化的现象。对板材来说,冲击试样除沿轧制方向截取外,其试样缺口轴线应垂直于轧制方向的表面层。

标准冲击试样外形尺寸为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ ,它分无缺口试样、V形缺口试样和 U形缺口试样三种。V形缺口试样和 U形缺口试样尺寸、表面粗糙度和缺口等尺寸要求如图 8-12 和图 8-13。无缺口试样外形尺寸、表面粗糙度同缺口试样。

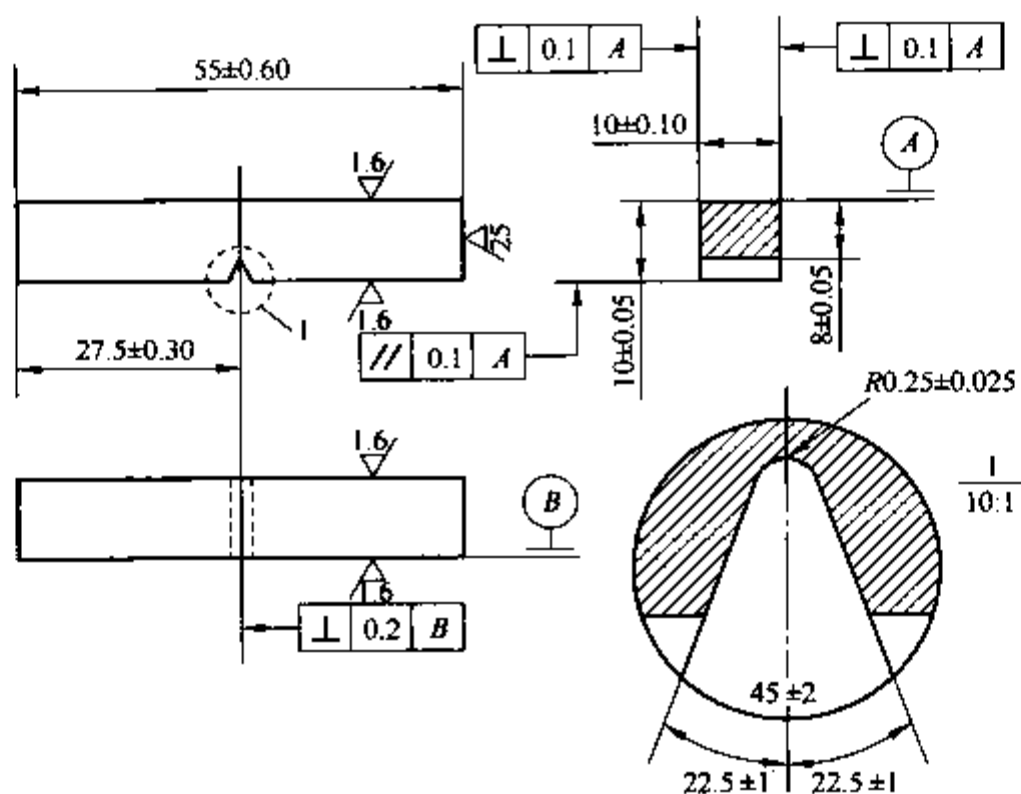


图 8-12 标准夏比 V 形缺口冲击试样

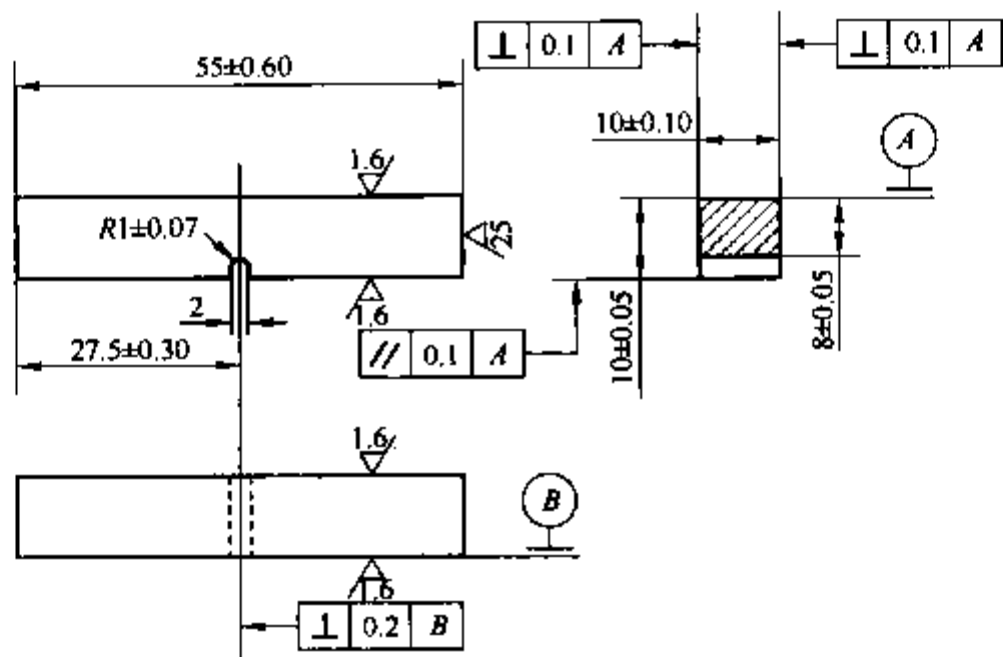


图 8-13 缺口深度为 2 mm 的标准夏比 U 形缺口冲击试样

注:另有缺口深度为 5 mm 的 U 形缺口冲击试样,加工图见 GB/T229

试样缺口的形式根据材料标准或协议标准规定。一般情况下,冲击试样缺口形式选择见表 8-12。

表 8-12 试样缺口形式的选择

试样特性、状态	冲击试样种类	试样外形尺寸
淬硬的高碳工具钢以及珠光体球墨铸铁等脆性材料	试样不开缺口	10 mm×10 mm×55 mm
合金钢	U形缺口	10 mm×10 mm×55 mm
低温冲击试验	V形缺口	10 mm×10 mm×55 mm
不能制备标准试样	根据要求可选试样不开缺口或 U形缺口或 V形缺口	10 mm×7.5 mm×55 mm 或 10 mm×5 mm×55 mm 试样的其他尺寸及公差与相应缺口的标准试样相同,缺口应开在试样的窄口上

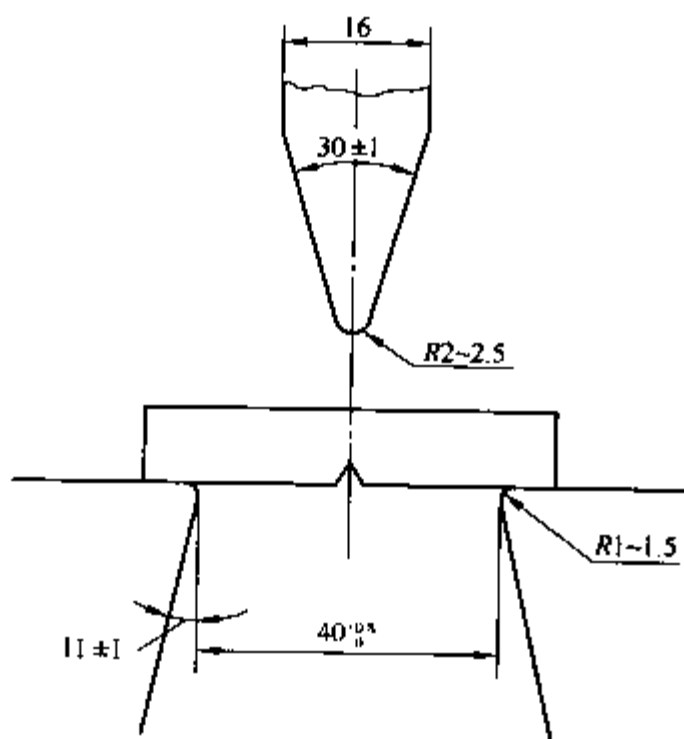


图 8-14 冲击试样支座及摆锤刀刃

## 2. 试验过程

(1) 冲击试验可分为室温、低温和高温冲击试验。应根据产品标准要求确定试验温度,室温冲击试验应在 18~28℃ 进行。如需要进行高温或低温冲击试验,可使用相应方法加热或冷却试样。一般低温冲击试验应用较广泛,可用低温仪,或用于冰+乙醇等。

(2) 试验前应检查摆锤空打时被动指针的回零差,回零差不应超过最小分度值的四分之一。

(3) 起动扬摆装置,使摆锤处在最高位置上。

(4) 将试样摆放在试验机支座的正确位置上,如图 8-14 所示。

(5) 释放摆锤,冲击被测试样,在试验机表盘上读出冲击吸收功数值。

## 3. 数据处理

试验过程中如因操作不当引起摆锤卡锤,则试验结果无效。如因试验机冲击能量不足造成试验完成时试样未完全折断,应注明试验机最大冲击能量写明试样未断开,冲击吸收功至少应保留两位有效数字,修约方法按 GB8170 执行。

## 五、其他力学性能试验

### 1. 金属压缩试验

金属压缩试验是测定金属在压应力作用下抗变形和抗破坏能力的试验。试验在普通万能材料试验机上进行,大多用于测定脆性或冷脆性材料,如生铁、铸造铝合金、轴承合金的力学性能,对于塑性材料一般不做压缩试验。金属压缩试验现行标准为 GB/T7314。

1) 试样 试样可分为侧向无约束试样与板状试样(需夹持在约束装置内进行试验)两大类。一般常使用侧向无约束试样见图 8-15 和图 8-16,试样长度  $L$  必须与其直径  $d_0$  或宽度  $b_0$  成比例关系。试样长度  $L$  与其直径  $d_0$  或宽度  $b_0$  比例关系不同可测不同性能指标,见表 8-13。压缩试验符号、说明见表 8-14。

表 8-13 按试样长度  $L$  与其直径  $d_0$  或宽度  $b_0$  的比例关系测定相应性能指标

$L$ 与 $d_0$ 或 $b_0$ 比例关系	$L = (2.5 \sim 3.5)d_0$ 或 $b_0$	$L = (5 \sim 8)d_0$ 或 $b_0$	$L = (1 \sim 2)d_0$ 或 $b_0$
测定压缩性能指标	$R_{pe}, R_{ic}, R_{eHc}, R_{eLc}, R_{mC}$	$R_{pe,0.01}, E_c$	$R_{mC}$

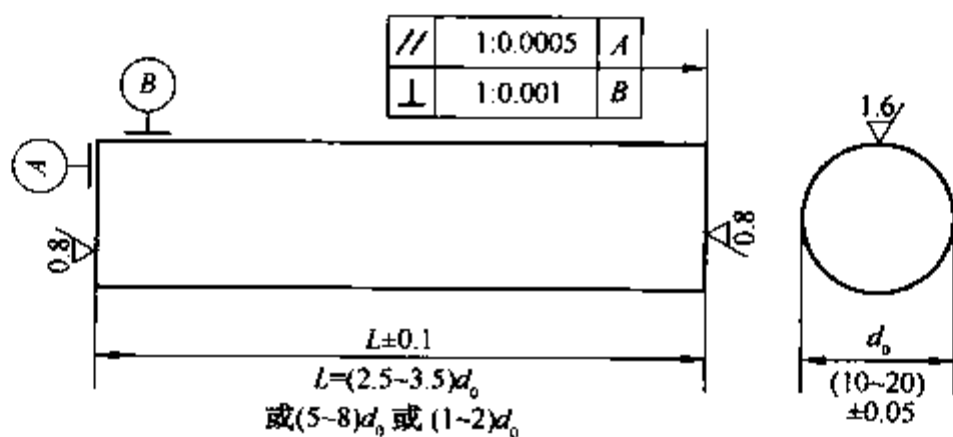


图 8-15 圆柱体压缩试验试样

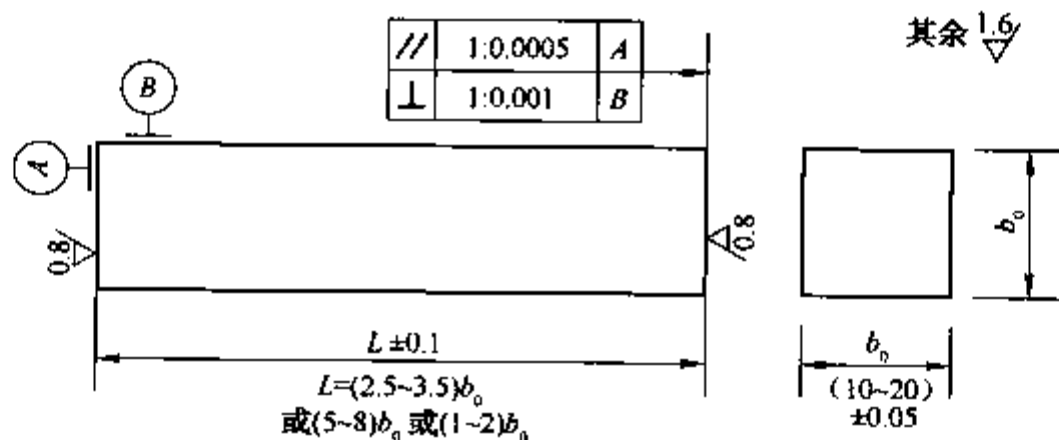


图 8-16 正方形柱体压缩试验试样

表 8-14 压缩试验符号、说明

符 号	说 明	单 位
$L$	试样长度	mm
$d$	试样原始直径	mm
$b$	试样原始宽度	mm
$R_{pc}$	规定非比例压缩强度	$N/mm^2$
$R_{tc}$	规定总压缩强度	$N/mm^2$
$R_{eHc}$	上压缩屈服强度	$N/mm^2$
$R_{eLc}$	下压缩屈服强度	$N/mm^2$
$R_{mc}$	脆性材料的抗压强度,或塑性材料的规定应变条件下的压缩应力	$N/mm^2$
$R_{pc0.01}$	规定非比例压缩应变为 0.01% 时的压缩应力	$N/mm^2$
$E_c$	压缩弹性模量	$N/mm^2$
$\Delta L$	原始标距段受力后的变形	mm

2) 压缩曲线与常用力学性能指标的测定 压缩试验的过程与拉伸试验相似,材料的抗外力变形和破坏情况可用压缩力  $F$  与变形  $\Delta L$  的关系曲线表示,脆性材料与塑性材料典型曲线如图 8-17。一般压缩试验中测定的力学性能指标有抗压强度  $R_{mc}$ 、相对压缩率  $\epsilon_c$  和相对断面扩展率  $\psi_c$  等。抗压强度  $R_{mc}$  计算公式:

$$R_{mc} = \frac{F_{mc}}{S_0} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

式中  $F_{mc}$ ——对于脆性材料为试样压至破坏过程中的最大实际压缩力；

$S_0$ ——试样原始横截面积。

$F_{mc}$ 可以在压缩曲线上读出，也可从测力度盘读取。

通过压缩试验曲线也能测定材料的压缩弹性模量  $E_c$ 、下压缩屈服强度  $R_{eLc}$ 、上压缩屈服强度  $R_{eHc}$  和规定非比例压缩强度  $R_{pc}$  等压缩试验的一些性能指标。测试方法类似金属室温拉伸试验方法，详见 GB/T7314 相关内容。

### 2. 金属扭转试验

金属扭转试验是测试金属在切应力作用下的力学性能。对于承受剪切扭转的机械零件，如主轴、钻杆、铆钉等具有重要实际意义。金属室温扭转试验现行标准 GB/T10128。

1) 试样 扭转试验的试样通常为圆形截面， $d_0 = 10\text{ mm}$ ， $L_0 = 50\text{ mm}$  或  $100\text{ mm}$ ，相应的  $L_c = 70\text{ mm}$  或  $120\text{ mm}$ ，试样示意图如图 8-18。

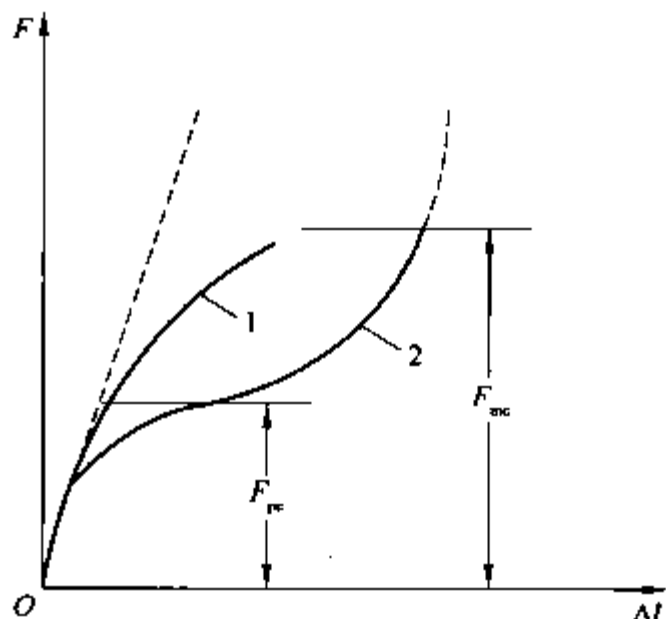


图 8-17 压缩试验曲线

1—铸铁压缩曲线；2—低碳钢压缩曲线

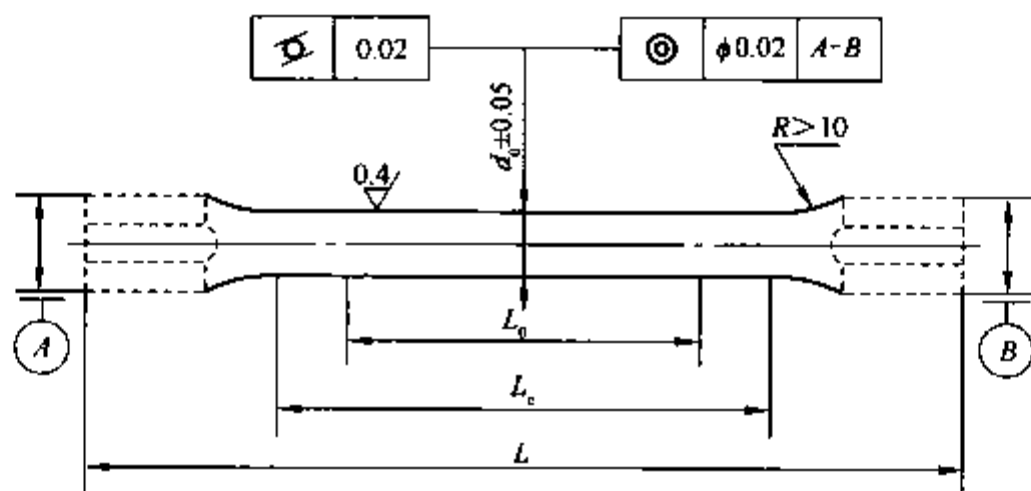


图 8-18 圆形扭转试验试样

扭转试验时，在试样两端缓慢地施加扭转力矩，从试验开始直至破断，试样工作长度上塑性变形都是均匀的。

2) 扭转曲线与常用力学性能指标的计算 利用自动记录装置可记录试验的扭矩—扭转角曲线，如图 8-19 所示。

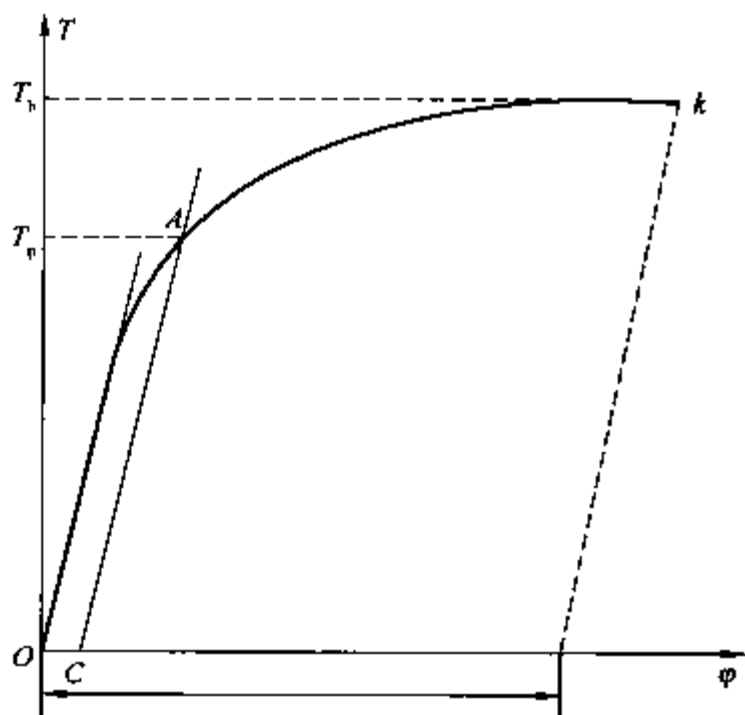


图 8-19 扭转曲线

(1) 切应力的计算公式：

$$\tau = \frac{T}{W}$$

式中  $\tau$ ——切应力 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )；

$W$ ——试样截面系数 ( $\text{mm}^3$ )， $W = \frac{\pi d_0^3}{16}$  (圆柱形试样的截面系数， $d_0$  为原始直径)；

$T$ ——扭矩 ( $\text{N} \cdot \text{mm}$ )。

(2) 切应变的计算公式：

$$\gamma = \frac{\varphi d_0}{2l_0} \times 100\%$$

式中  $\gamma$ ——切应变 (%)；

$\varphi$ ——扭角 (rad)；

$l_0$ ——试样原始标距 (mm)，当使用扭转计时， $l_0$  表示扭转计标距。

(3) 抗扭强度的计算公式:

$$\tau_b = \frac{T_b}{W}$$

式中  $\tau_b$ ——抗扭强度, 试样在扭断前承受的最大扭矩(N/mm<sup>2</sup>);

$T_b$ ——最大扭矩(mm)。

通过扭转试验还能测出材料的切变模量  $G$ 、规定非比例扭转应力  $\tau_p$ , 详见 GB/T10128 的相关内容。

### 3. 金属剪切试验

在对金属构件的检测工作中, 对于那些实际服役过程中受剪切应力的铆钉、销钉、键等构件, 除测定其抗拉强度和抗压强度等性能外, 还必须考虑构件的抗剪强度。按试样受力方式不同剪切试验一般可分为单剪试验和双剪试验两种。剪切试验一般在剪切试验夹具中进行, 如图 8-20 所示, 它有实物抗剪切试验和加工成试样的抗剪切试验。试样一般为圆柱形, 如图 8-21 所示。

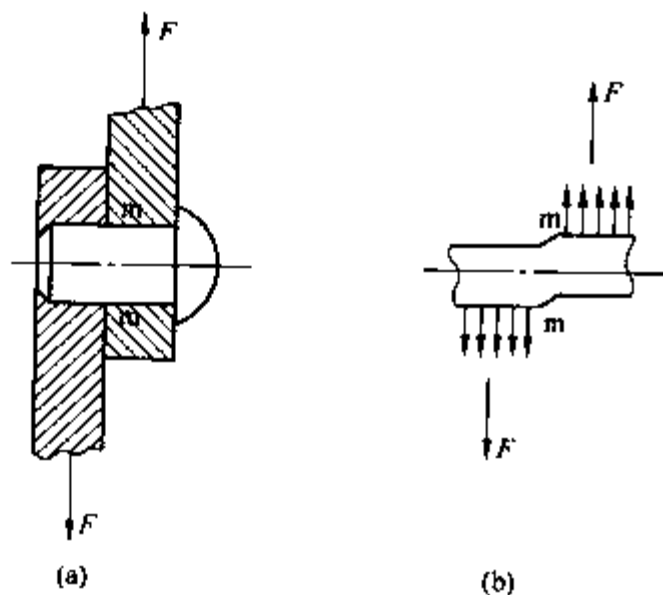


图 8-20 单剪试验的受力和变形状态

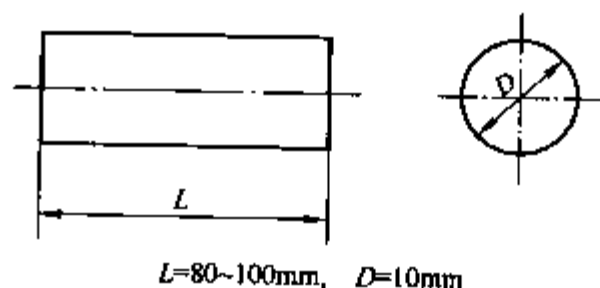


图 8-21 剪切试样

1) 单剪试验 剪切时, 试样受力方式和变形状态如图 8-20 所示, 单剪试验中, 抗剪强度的计算公式:

$$\tau = \frac{F}{S_0}$$

式中  $\tau$ ——剪切强度(N/mm<sup>2</sup>);

$F$ ——试样被剪断时的最大力(N);

$S_0$ ——试样的原始横截面积(mm<sup>2</sup>)。

2) 双剪试验 双剪试验是最常用的剪切试验, 其专用装置如图 8-22 所示, 其试样的受力方式如图 8-23 所示。双剪试验中, 抗剪强度计算公式:

$$\tau = \frac{F}{2S_0}$$

式中,  $\tau$ 、 $F$ 、 $S_0$  的含义与单剪试验中抗剪强度的计算公式中相同。

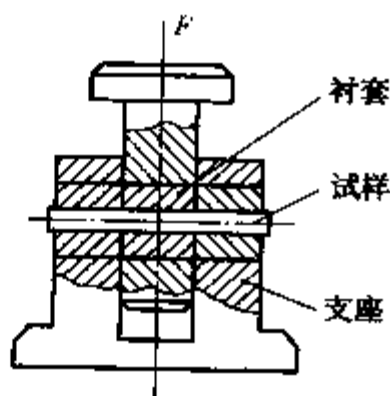


图 8-22 双剪切试验夹具装置

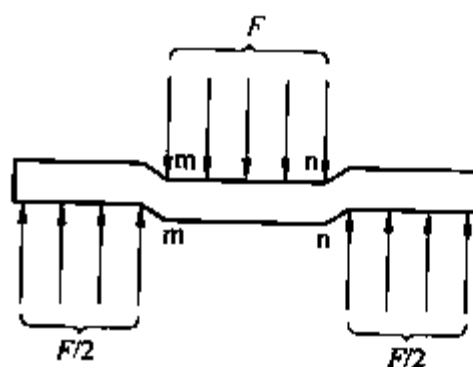


图 8-23 双剪试验受力状况



3) 冲孔式剪试验 该试验主要是为测试金属薄板的抗剪性能,一般采用圆形冲头冲孔,其抗剪强度计算公式:

$$\tau = \frac{F}{\pi d_0 a}$$

式中  $d_0$ ——冲孔直径(mm);  
 $a$ ——金属板厚度(mm);  
 $F$ ——试样冲孔时的最大力(N)。

#### 4. 疲劳试验

在交变载荷作用下,机械构件的断裂称为疲劳。疲劳试验是用一组试样、模型或全尺寸零部件在循环载荷下进行试验以提供材料或工件的某种疲劳数据的试验,疲劳试验的分类见表 8-15。

表 8-15 疲劳试验的分类

分 类	试 验 方 法
按失效循环数分	高周疲劳试验(失效循环数 $N$ 大于 $10^4 \sim 10^5$ 次)
	低周疲劳试验(失效循环数 $N$ 小于 $10^4 \sim 10^5$ 次)
按应力循环的类型分	恒幅疲劳试验
	程序疲劳试验
	随机疲劳试验
按加载方式分	弯曲疲劳试验
	接触疲劳试验
	冲击疲劳试验
	拉压疲劳试验、扭转疲劳试验
按试验目的分	材料疲劳性能试验
	疲劳设计系数试验
	实物疲劳试验

#### 1) 疲劳性能指标

通过材料的疲劳性能试验,结合理论公式可得出反映某种材料抗疲劳性能的特性曲线和力学指标。最常用的疲劳特性曲线是  $S-N$  曲线(应力-疲劳寿命曲线),见图 8-24。

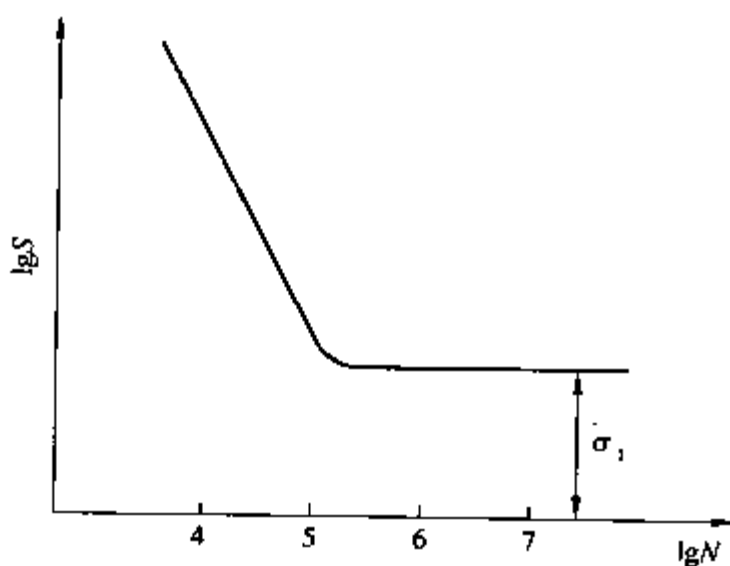


图 8-24  $S-N$  曲线

$S$ —材料受交变应力;  $N$ —循环周数

图中  $\sigma_{-1}$  表示材料的疲劳极限,它表示当材料所受应力小于这个值时,材料经无限多次循环应力也不会发生疲劳断裂, $\sigma_{-1}$  的下标“-1”表示交变应力为对称循环,如交变应力不是对称循环,则下标用实际应力对称系数  $r$  表示,公式为:

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

$\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$  分别表示循环应力的最大与最小值。

实际进行试验时,一般规定以  $N = 10^7 \sim 10^8$  在  $S-N$  曲线上所对应的应力  $S$  为材料的条件疲劳极限  $\sigma_{-1}$ 。 $\sigma_{-1}$  是最常用的表征材料抗疲劳断裂能力的指标,它与材料的抗拉强度  $R_m$  之间有良好的相关性,见表 8-16。

表 8-16 常用金属材料的疲劳比

材料	钢	铸铁	铝合金	镁合金	铜合金	镍合金	钛合金
$\sigma_{-1}/R_m$	0.35~0.60	0.30~0.50	0.25~0.50	0.30~0.50	0.25~0.50	0.30~0.50	0.30~0.60

通过疲劳试验可以测出包括 S—N 曲线在内的各种特性曲线,见表 8-17。

表 8-17 各类疲劳曲线的名称

疲劳试验	疲劳曲线
低周疲劳试验	循环应力—应变曲线( $\Delta\sigma$ — $\Delta\varepsilon$ 曲线)
	应变幅—疲劳寿命曲线( $\Delta\varepsilon_p$ —N 曲线)
高周疲劳试验	应力—疲劳寿命曲线(S—N 曲线)
	存活率—应力—疲劳寿命曲线(P—S—N 曲线)

2) 疲劳试验的现行标准 下面列出部分国内通用的疲劳试验标准:

GB/T3075《金属轴向疲劳试验方法》;

GB/T4337《金属旋转弯曲疲劳试验方法》;

GB/T12443《金属扭应力疲劳试验方法》;

GB/T15248《金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法》;

YB/T5345《金属材料滚动接触疲劳试验方法》。

3) 几种疲劳试验方法介绍

(1) 弯曲疲劳试验法:

弯曲疲劳试验是应用较为广泛的测试材料抗疲劳性能的方法。它分圆试样的旋转弯曲疲劳试验和平板试样的平面弯曲疲劳试验两大类。它们试验的条件和方法不同点见表 8-18。

表 8-18 两种弯曲疲劳试验的不同点

试验名称	试样	加载形式	试验机	注意要点
旋转弯曲疲劳试验	圆柱形或漏斗形试样	靠砝码和杠杆系统在试样上加恒定弯矩	专用的旋转弯曲疲劳试验机,转速3 000~10 000 r/min	试样制备和装夹时必须保证试样工作段与试验机转轴的同轴度
平面弯曲疲劳试验	平板试样或圆截面试样	通过专用的四点弯曲和三点弯曲加载装置在试样上施加交变弯曲力矩	专用机或一般轴向加载疲劳试验机,加载频率从每分钟几十次到一万次	试验机在板状试样上的加力点应同时均匀接触

弯曲疲劳试验的弯曲装置又可分为三点弯曲和四点弯曲。四点弯曲加载时,试样有较大部分体积承受所要求的试验应力,没有附加的切应力,为纯弯曲疲劳试验;而采用三点弯曲加载时,严格来讲试样受的是平面应力。因此在条件许可的情况下,应优先选择四点弯曲加载方式。

(2) 接触疲劳试验:

所谓接触疲劳失效现象是指相互接触的滚动工件在较高的接触压力作用下,经一定周次的应力循环后,在工作表面的局部区域材料发生剥落,形成麻点或凹坑的磨损现象。齿轮、凸轮和滚动轴承都是最常见的易发生接触疲劳失效的工件。接触疲劳试验就是模拟工件在实际使用中的受力状态,用以测定材料接触疲劳极限的试验方式。

接触疲劳极限的循环基数  $N_0$  按试验材料而定。对于低碳钢,  $N_0 = (2 \sim 4) \times 10^6$ , 淬火回火钢  $N_0 = (10 \sim 20) \times 10^6$ , 铸铁  $N_0 = (2 \sim 6) \times 10^6$ 。接触疲劳试验的加载方式有纯滚动、具有定值滑动的滚动、具有牵引力矩的滚动、脉动接触等。

(3) 冲击疲劳试验：

冲击疲劳试验是由重复冲击载荷引起试样疲劳破坏的试验，冲击疲劳试验可分为：多次冲击法和施加平缓的周期性简谐冲击载荷法。多次冲击法试验应用较为广泛，一般是用一定直径和长度的圆柱形试样，经三点和四点冲击弯曲加载(图 8-25)，用冲击能量  $A$  和相应的破断周次  $N$  绘成  $A-N$  曲线(图 8-26)，来表示材料抗多次冲击加载的能力。

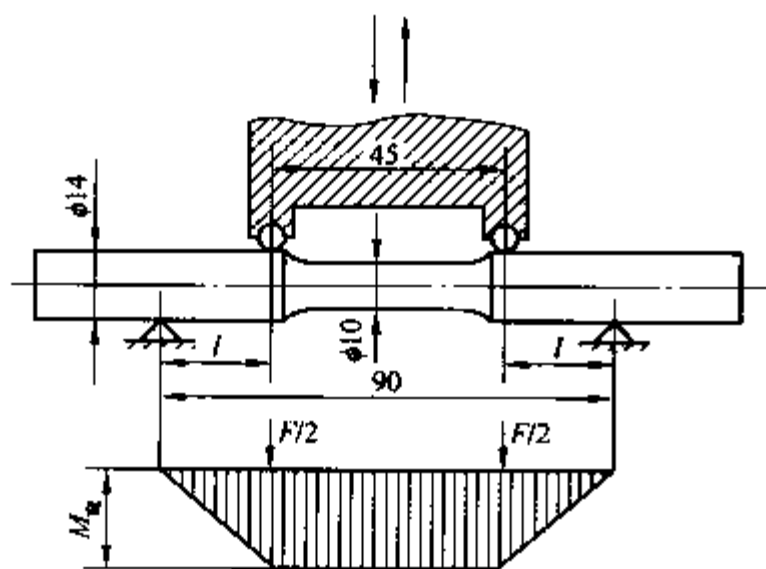


图 8-25 多次冲击弯曲试验

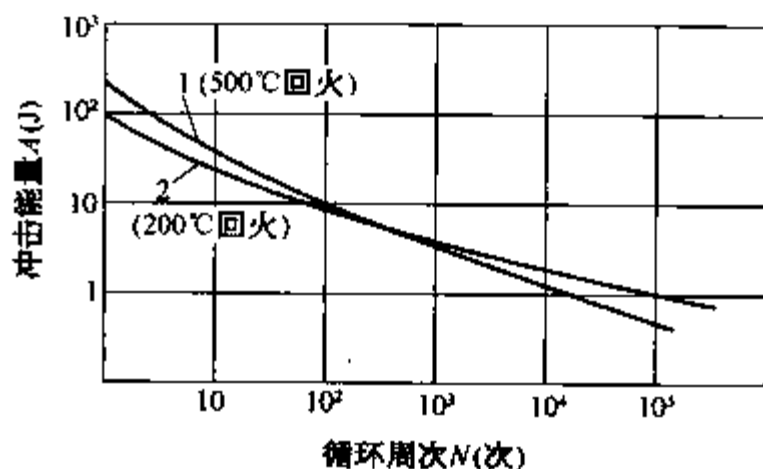


图 8-26 典型多次冲击  $A-N$  曲线(35 钢)

图 8-26 曲线表明对于 35 钢，当冲击载荷大而循环周次较低时，采用 500℃ 回火工艺的材料抗多次冲击能力较强，而当冲击载荷较小而循环周次较高时，采用 200℃ 回火工艺的材料抗多次冲击能力更强。而后者更类似于工件实际服役时的受力情况。因而对于一般承受冲击载荷的工件，在选择材料或进行热处理时，应主要考虑材料的强度，而非较大的一次冲击韧性。多次冲击试验法还表明：① 随冲击能量的增加，为使多次冲击抗力增加，需要材料有较高的塑性和韧性与强度配合；② 对抗拉强度  $R_m < 1\ 000\ \text{MPa}$  的材料，提高材料的塑、韧性对提高多次冲击抗力意义不大，而对抗拉强度  $R_m > 1\ 500\ \text{MPa}$  的材料，适当提高材料的塑、韧性对提高多次冲击抗力影响较为显著。

在多次冲击疲劳试验机上加装特殊的传感器和示波器，还可以求得冲击应力  $\sigma$  或应变  $\epsilon$  与冲击循环次数  $N$  的关系曲线 ( $S-N$  曲线)，高冲击能量低循环周次(从几百次至几万次)的  $S-N$  曲线大致符合低周疲劳关系，而低冲击能量高循环周次(几十万次以上)的  $S-N$  曲线类似于平稳加载情况下的  $S-N$  曲线，因此也可以根据这一曲线来确定出材料的冲击疲劳极限。由于冲击疲劳试验的加载速率比平稳加载时大两个数量级，因此两种试验条件下求得的疲劳极限数值有一定差别，可以用冲击疲劳强度系数表示：

$$\text{冲击疲劳强度系数} = \frac{\text{冲击疲劳极限}}{\text{平稳加载疲劳极限}}$$

不同钢种的冲击疲劳强度系数大致范围见表 8-19。

表 8-19 不同钢种的冲击疲劳强度系数

钢 种	退 火 钢	正火与高温回火钢	中温回火钢	低温回火钢
冲击疲劳强度系数	1.14~1.19	0.97~1.01	0.90~0.91	0.80~0.91

4) 热处理对材料疲劳性能的影响

(1) 通过热处理得到复合组织(以高强度马氏体为基体，带有一定形状及数量分布的残留奥氏体、铁素体、贝氏体等第二相)能够提高材料的疲劳性能。

(2) 等温淬火与淬火回火比较，在达到相同静强度(硬度)条件下，能使材料有较高的疲劳极限。

(3) 表面热处理，如渗碳、渗氮、碳氮共渗、感应淬火等工艺能明显提高工件的疲劳极限。

5. 金属高温力学性能试验

金属材料在高温下力学性能与室温下有很大不同，除温度的升高对材料强度、塑性的影响外，载荷的保持

时间对材料的力学性能也有重大影响。因此,对某些需长期在高温环境下服役的工件(如航空、化工、锅炉、电站行业中的高温构件)的材料,需要进行高温长时力学性能试验,以测试其蠕变极限或持久极限强度等力学指标。

1) 高温蠕变试验 金属材料在高于一定温度和一定应力作用下,即使应力小于屈服强度,也会随着时间的增长而缓慢地产生塑性变形,这种现象称为蠕变,这种变形最后导致材料的断裂称为蠕变断裂。典型的蠕变曲线见图 8-27 所示。

图中  $ab$  段(区域 I)为减速蠕变阶段; $bc$  段(区域 II)为恒速蠕变阶段; $cd$  段(区域 III)为加速蠕变阶段; $d$  点为试样断裂点。

蠕变极限是表征高温长期载荷下材料抵抗塑性变形的力学指标,确定蠕变极限的方法有两种,见表 8-20。

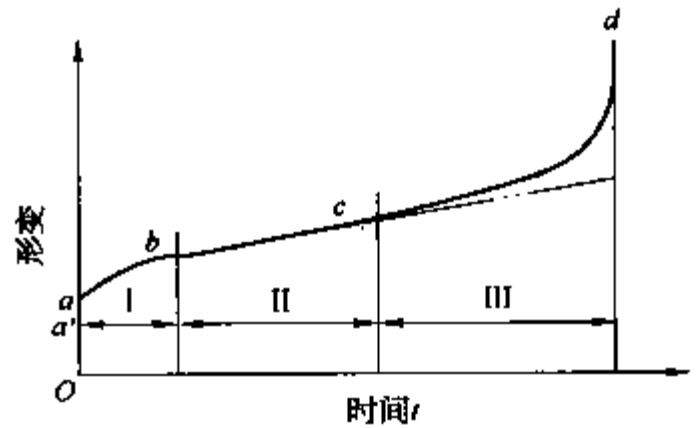


图 8-27 典型的蠕变曲线

表 8-20 蠕变极限确定方法

蠕变极限确定方法	表示符号	举 例
在给定室温 $T$ 下,使试样在恒速蠕变阶段蠕变速率等于规定值时对应的应力值	$\sigma_{\dot{\epsilon}}^T$ $T$ 为给定温度( $^{\circ}\text{C}$ ); $\dot{\epsilon}$ 为规定蠕变速率( $\%/h$ )	$\sigma_{1 \times 10^{-5}}^{600} = 60 \text{ MPa}$ 表示在 $600^{\circ}\text{C}$ 温度下,恒速蠕变速率为 $1 \times 10^{-5} \%/h$ 时的蠕变极限为 $60 \text{ MPa}$
在给定温度 $T$ 和规定的试验时间 $t$ (h)内,使试样产生规定蠕变总伸长率 $\delta$ (%)时对应的应力值	$\sigma_{\delta/t}^T$ $T$ 为给定温度; $\delta$ 为规定蠕变总伸长率(%); $t$ 为规定试验时间(h)	$\sigma_{1/10^5}^{500} = 10 \text{ MPa}$ 表示在 $500^{\circ}\text{C}$ 温度下,试验 $10$ 万 h 后蠕变总变形量为 $1\%$ 时的蠕变极限为 $10 \text{ MPa}$

用这两种方法所确定的蠕变极限在一定条件下可以相互转换。一般情况下,由于第二种确定蠕变极限方法的时间  $t$  规定较长,因此通常以第一种方法来确定蠕变极限  $\sigma_{\dot{\epsilon}}^T$ 。

GB/T2039《金属拉伸蠕变及持久试验方法》规定了进行高温蠕变试验的方法。

2) 高温持久强度极限试验 蠕变极限仅体现了材料在高温长期受力条件下的抗塑性变形能力,而持久强度极限是表征材料在高温长期受力条件下的抗断裂能力,持久强度极限的定义为:试样在一定温度和规定时间内不发生蠕变断裂的最大应力值,以  $\sigma_t^T$  表示,单位 MPa。例如  $\sigma_{1 \times 10^3}^{700} = 30 \text{ MPa}$  表示某材料在  $700^{\circ}\text{C}$  温度下,经  $1000 \text{ h}$  后发生断裂所对应的应力为  $30 \text{ MPa}$ 。

金属高温持久试验方法同样按 GB/T2039《金属拉伸蠕变及持久试验方法》。

通过持久试验不仅可测出材料的持久抗断性能,也能测试材料的持久塑性指标,在高温长时拉伸试样至试样断裂后,测量其断后伸长率与断面收缩率。这两个数据是衡量材料蠕变脆化的重要指标,一般要求持久塑性不小于  $3\% \sim 5\%$ 。

3) 热处理工艺对金属材料高温力学性能的影响 适当提高耐热钢加热温度,能促进碳化物充分而均匀地溶入奥氏体中,回火温度高于使用温度  $100 \sim 150^{\circ}\text{C}$  以上,可提高使用温度下的组织稳定性。

奥氏体耐热钢或合金采用固溶处理和时效处理后得到适当晶粒度,强化相分布得到进一步改善;有的合金固溶处理后再进行一次中间(固溶或时效)处理,使硫化物沿晶界呈断续状析出,可使持久强度和持久塑性明显提高。

如果采用形变热处理来改变晶界形状(如形成锯齿状),并在晶粒内部形成多边化的亚晶界,可使合金进一步强化,在持久强度提高  $20\%$  以上的同时,仍具有较高的持久塑性。

## 第二节 硬度试验

金属的硬度在一定程度上反映了金属材料在化学成分、显微组织和热处理工艺上的差异,是一个由材料的弹性、塑性、韧性等一系列不同力学性能组成的综合性指标。硬度值不仅取决于材料本身,而且还取决于试验方法。因此,不同试验条件下的硬度值不能直接相比较。

不同的热处理状态,要采用相应的硬度试验方法,同时也要根据不同材料的特性及零部件形状来合理选取硬度试验方法。

硬度通常是按施加试验力的速度分类,有静力硬度试验(如布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等)和动力硬度试验(如肖氏硬度、里氏硬度等)两大类。

### 一、金属布氏硬度试验

该试验适于测试铸铁、有色金属和各种退火、淬火及中、高温回火处理后的材料,特别对于较软的,晶粒粗大且组织不均匀的金属材料的硬度测定相对比较准确。

#### 1. 试验原理

用一定直径  $D$  的硬质合金球,以相应的试验力  $F$  压入试验表面,经规定的保持时间后,卸除试验力,测量试样表面压痕直径  $d$ ,见图 8-28。根据  $d$  可以计算出压痕球形表面积  $S$ 。此面积上承受的平均压力就称为布氏硬度值,单位为  $\text{kgf}/\text{mm}^2$ 。布氏硬度的符号用 HBW 表示。布氏硬度值的计算公式如下:

$$\text{HBW} = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi D h}$$

式中  $F$ ——试验力;  
 $S$ ——压痕球形表面积;  
 $D$ ——硬质合金压头直径;  
 $h$ ——压痕深度。

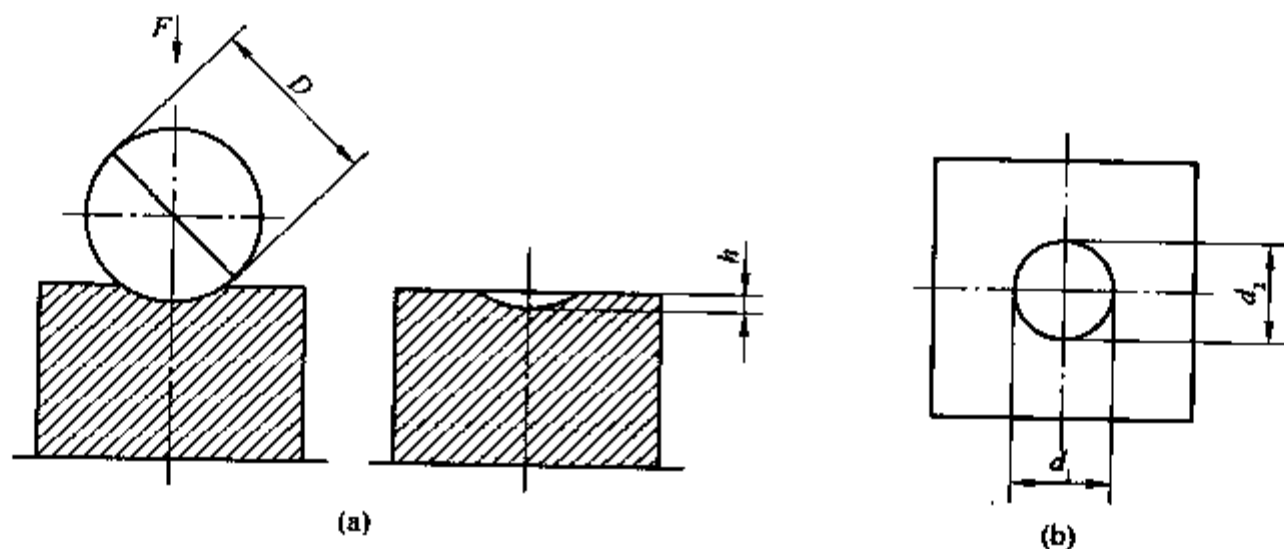


图 8-28 布氏硬度试验原理

(a) 压头(硬质合金球); (b) 布氏硬度压痕

实际工作中,用测量压痕直径方法来求出布氏硬度值:

$$\text{HBW} = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中  $F$ ——试验力(kgf);

$d$ ——压痕平均直径(mm),  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ ,  $d_1$ 、 $d_2$  是在两相互垂直方向测量的压痕直径。

## 2. 布氏硬度试验规范

布氏硬度值的表示中要明确所用压头材料,按现行标准均使用硬质合金球,则布氏硬度用 HBW 表示,布氏硬度试验范围上限为 650 HBW。试验力—压头球直径平方的比率( $F/D^2$  比值)应根据材料和硬度值选择,不同材料的试验力—压头球直径平方的比率见表 8-21。

表 8-21 不同材料的试验力—压头球直径平方的比率

材 料	布氏硬度 HBW	试验力—压头球直径平方的比率 $F/D^2$
钢、镍合金、钛合金		30
铸 铁	<140	10
	$\geq 140$	30
铜及铜合金	<35	5
	35~200	10
	>200	30
轻金属及合金	<35	2.5
	35~80	5、10、15
	>80	10、15
铅、锡		1

## 3. 试验条件与要求

(1) 试验一般在 10~35℃ 室温进行。对于温度要求严格的试验,温度为 (23±5)℃。

(2) 试样表面应平整、光滑,上下两表面应平行。试样表面应能保证压痕直径的精确测量,表面粗糙度  $R_a$  一般不大于 1.6  $\mu\text{m}$ 。

(3) 试样厚度至少应为压痕深度的 8 倍。压痕深度  $h$  的计算公式:  $h = \frac{F}{\pi D \text{HBW}}$ 。试验后试样背后不能出现可见变形。

(4) 任一压痕中心距试样边缘的距离不小于压痕直径的 2.5 倍,两相邻压痕中心间距离不小于压痕直径的 3 倍。

(5) 试验力与压头球直径平方的比率应根据材料和硬度值选择,详见表 8-21。试验力的选择应保证压痕直径在 0.24D~0.6D 之间。当试样尺寸允许时,应优先选用直径 10 mm 的球压头进行试验。

(6) 试验力保持时间为 10~15 s。对于要求试验力保持时间较长的材料,应在布氏硬度值的表示中进行标注。

(7) 应在两相互垂直方向测量压痕直径。用两个读数的平均值计算布氏硬度,或按照现行标准 GB/T231.1《金属布氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》附录 B 查得布氏硬度值。

## 4. 布氏硬度表示方法

把测得的布氏硬度值写在 HBW 之前,符号后按顺序用数值表示试验条件:① 硬质合金球直径;② 试验力;③ 试验力保持时间(10~15 s 不标注)。

例如:256 HBW 5/750 表示用 5 mm 硬质合金球在 750 kgf 试验力作用下保持 10~15 s,测得的布氏硬度值为 256。

例如:80 HBW 5/250/20 表示用 5 mm 硬质合金球在 250 kgf 试验力作用下保持 20 s,测得的布氏硬度值为 80。

## 二、金属洛氏及表面洛氏硬度试验

标准洛氏硬度试验的总试验力为 60 kgf、100 kgf 和 150 kgf。表面洛氏硬度试验的总试验力为 15 kgf、30 kgf 和 45 kgf,可用来测试极薄材料和渗层或镀层的硬度。

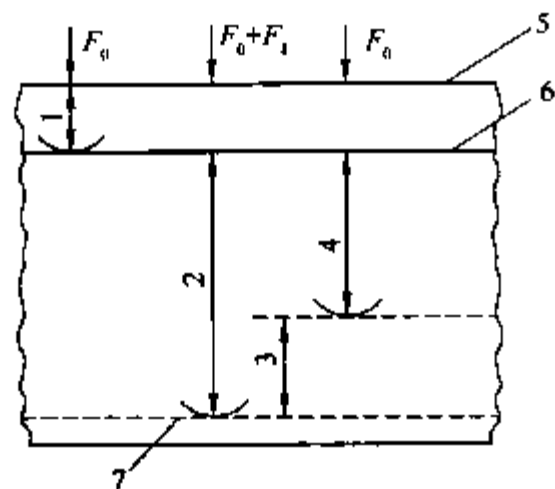


图 8-29 洛氏硬度测试原理

- 1—在初试验力  $F_0$  下的压入深度;
- 2—由主试验力  $F_1$  引起的压入深度;
- 3—卸除主试验力  $F_1$  后的弹性回复深度;
- 4—残余压入深度  $h$ ;
- 5—试样表面;
- 6—测量基准面;
- 7—压头位置

1. 试验原理

将压头(金刚石圆锥体、钢球或硬质合金球)按图 8-29 分两个步骤压入试样表面,经规定保持时间后,卸除主试验力,测量在初试验力下的残余压痕深度  $h$ 。

根据  $h$  值及常数  $N$  和  $S$ (符号、说明见表 8-22),用公式计算洛氏硬度:

$$\text{洛氏硬度} = N - \frac{h}{S}$$

表 8-22 洛氏硬度相关符号及说明

符 号	说 明	单 位
$F_0$	初试验力	kgf
$F_1$	主试验力	kgf
$F$	总试验力	kgf
$S$	给定标尺的单位	
$N$	给定标尺的硬度数	
$h$	卸除主试验力后,在初试验力下压痕残留的深度(残余压痕深度)	mm
HRA、HRC、HRD	洛氏硬度 = $100 - \frac{h}{0.002}$	
HRB、HRE、HRF HRG、HRH、HRK	洛氏硬度 = $130 - \frac{h}{0.002}$	
HRN、HRT	表面洛氏硬度 = $100 - \frac{h}{0.001}$	

2. 洛氏硬度标尺

洛氏硬度共有 15 种标尺(洛氏 9 种,表面洛氏 6 种),见表 8-23 所示。

表 8-23 洛氏硬度标尺一览表

洛氏硬度标尺	硬度符号	压 头 类 型	初试验力 $F_0(N)/(kgf)$	总试验力 $F(N)/(kgf)$	有效测试范围
A	HRA	金刚石圆锥	98.07(10)	588.4(60)	20~88 HRA
B	HRB	直径 1.5875 mm 球	98.07(10)	980.7(100)	20~100 HRB
C	HRC	金刚石圆锥	98.07(10)	1471(150)	20~70 HRC
D	HRD	金刚石圆锥	98.07(10)	980.7(100)	40~77 HRD
E	HRE	直径 3.175 mm 球	98.07(10)	980.7(100)	70~100 HRE
F	HRF	直径 1.5875 mm 球	98.07(10)	588.4(60)	60~100 HRF
G	HRG	直径 1.5875 mm 球	98.07(10)	1471(150)	30~94 HRG
H	HRH	直径 3.175 mm 球	98.07(10)	588.4(60)	80~100 HRH
K	HRK	直径 3.175 mm 球	98.07(10)	1471(150)	40~100 HRK
15N	HR15N	金刚石圆锥	29.42(3)	147.1(15)	70~94 HR15N
30N	HR30N	金刚石圆锥	29.42(3)	294.2(30)	42~86 HR30N
45N	HR45N	金刚石圆锥	29.42(3)	441.3(45)	20~77 HR45N
15T	HR15T	直径 1.5875 mm 球	29.42(3)	147.1(15)	67~93 HR15T
30T	HR30T	直径 1.5875 mm 球	29.42(3)	294.2(30)	29~82 HR30T
45T	HR45T	直径 1.5875 mm 球	29.42(3)	441.3(45)	10~72 HR45T

注:使用钢球压头的标尺,硬度符号后面加“S”。使用硬质合金球压头的标尺,硬度符号后面加“W”。

在实际检验中,应根据试样的硬度和试验层厚度来选择合适的标尺,一般情况下,洛氏硬度各标尺应用情况可参考表 8-24。

表 8-24 洛氏硬度各标尺应用举例

硬度符号	应用举例	硬度符号	应用举例
HRA	硬金属及硬质合金	HRK	有色金属、塑料
HRB	有色金属及软金属	HR15N	硬质合金、渗氮钢、渗碳钢、钢带等
HRC	热处理后结构钢、工具钢	HR30N	表面淬火钢、渗碳钢、刀片、薄钢板等
HRD	薄钢、表面淬火钢	HR45N	淬火钢、调质钢、零件边缘等
HRE	塑料	HR15T	退火铜合金、薄软钢、黄铜、青铜薄板等
HRF	有色金属	HR30T	薄软钢、铝合金、铜合金、黄铜、青铜等
HRG	珠光体铁、铜、镍、锌合金	HR45T	珠光体铁、铜镍合金和锌镍合金薄板等
HRH	退火铜合金		

### 3. 试验条件与要求

- (1) 试验环境温度、试样表面质量及平行度与布氏硬度测定要求相同。建议测试面粗糙度  $R_a$  不大于  $0.8 \mu\text{m}$ 。
- (2) 应对圆柱形试样作适当支承,尤其应注意使压头、试样、V形槽与硬度计支座中心对中。
- (3) 在试验过程中,加载、卸载应平稳、均匀、无振动和冲击。
- (4) 对于用金刚石圆锥压头进行试验,试样或试验层厚度应不小于残余压痕深度的 10 倍;对于用球压头进行试验,试样或试验层厚度应不小于残余压痕深度的 15 倍。洛氏硬度检测与试样最小厚度关系图见 GB/T230.1《金属洛氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》附录。
- (5) 试样测试面为圆柱面或球面,必须对试验结果数据进行修正,详见 GB/T230.1。
- (6) 两相邻压痕中心之间的距离不应小于 2 mm;任一压痕中心距试样边缘的距离不应小于 1 mm。
- (7) 总试验力  $F$  保持时间为  $(4 \pm 2)\text{s}$ 。然后卸除主试验力  $F_1$ ,保持初试验力  $F_0$ ,经短时间稳定后,进行读数。
- (8) 洛氏硬度值用公式由残余压痕深度  $h$  计算出,在试验时通常从测量装置中直接读取。
- (9) 如无其他规定,每个试样上的试验点数不少于 4 点,第 1 点不计。
- (10) 试验结果,洛氏硬度值至少应精确至 0.5 HR。

### 4. 洛氏硬度表示方法

(1) 用金刚石压头测试洛氏硬度,用硬度值、符号 HR 和使用的标尺表示。

例如:56.0 HRC 表示用 C 标尺测得的洛氏硬度值为 56.0;90.6 HR15N 表示用总试验力为 147.1 N (15 kgf) 的 15 N 标尺测得的表面洛氏硬度值为 90.6。

(2) 用球压头测试洛氏硬度,用硬度值、符号 HR 和使用的标尺和球压头材料的代号(钢球为 S,硬质合金球为 W)表示。

例如:78.6 HRBW 表示用硬质合金球压头在 B 标尺上测得的洛氏硬度值为 78.6;60.3 HR30TS 表示用钢球压头在总试验力为 294.2 N(30 kgf) 的 30 T 标尺测得的表面洛氏硬度值为 60.3。

## 三、金属维氏硬度试验

维氏硬度试验方法属于静力硬度试验中的压痕法,试验原理与布氏硬度试验相同,测量范围宽广,软硬材料都可以测试,当选用小负荷(0.01~3 kgf)时,也能很好地满足薄而硬的材料测试要求。

### 1. 试验原理

维氏硬度测试原理和方法与布氏硬度基本相同,也是根据单位压痕表面积上所承受的载荷大小来定义硬度值。不同的是测定维氏硬度所用压头为金刚石制成的四方锥体,两相对面夹角  $\alpha$  为  $136^\circ$ ,所加载荷较小。测定维氏硬度时,也是以一定载荷的力将压头压入试样表面,保持一定时间后卸载,试样表面留



下压痕,见图8-30。

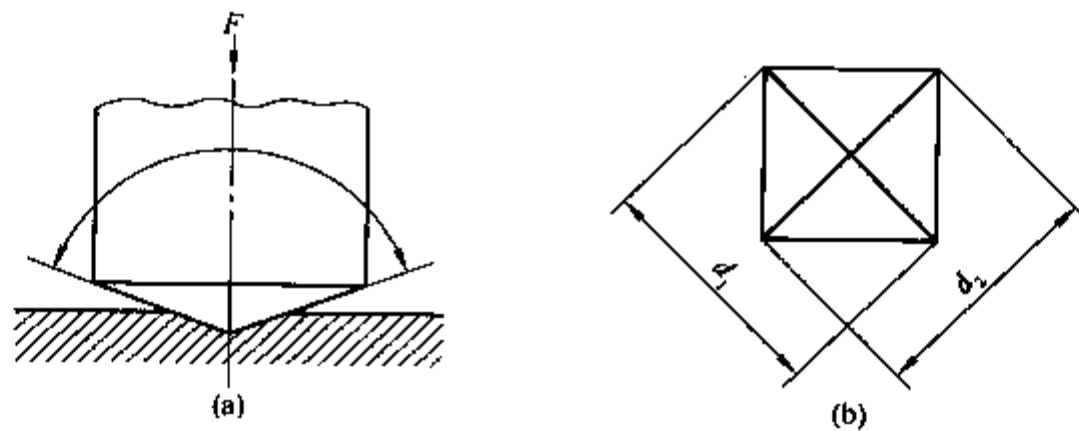


图8-30 维氏硬度试验原理

(a) 压头(金刚石锥体); (b) 维氏硬度压痕

已知载荷  $F$ , 测定压痕两对角线长度后取平均值  $d$ , 代入公式求维氏硬度 HV。

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin(136^\circ/2)}{d^2} \approx 1.8544 \frac{F}{d^2}$$

式中  $F$ ——试验力(kgf);

$d$ ——两压痕对角线长度  $d_1$  和  $d_2$  的算术平均值(mm)。

当载荷一定时,测定压痕两对角线长度的平均值  $d$ ,根据公式可求出维氏硬度值,或者根据载荷、压痕对角线长度算术平均值  $d$  按现行标准 GB/T4340.1《金属维氏硬度试验 第1部分:试验方法》附录C查出维氏硬度值。

### 2. 维氏硬度试验硬度符号与试验力的对应关系

维氏硬度试验按试验力的大小级别可分为3小类:维氏硬度试验、小负荷维氏硬度和显微硬度。各种硬度符号与试验力的对应值见表8-25所示。

表8-25 维氏硬度试验分类、硬度符号与试验力

维氏硬度试验		小负荷维氏硬度试验		显微维氏硬度试验	
硬度符号	试验力(N)/(kgf)	硬度符号	试验力(N)/(kgf)	硬度符号	试验力(N)/(kgf)
HV5	49.03(5)	HV0.2	1.961(0.2)	HV0.01	0.09807(0.01)
HV10	98.07(10)	HV0.3	2.942(0.3)	HV0.015	0.1471(0.015)
HV20	196.1(20)	HV0.5	4.903(0.5)	HV0.02	0.1961(0.02)
HV30	294.2(30)	HV1	9.807(1)	HV0.025	0.2452(0.025)
HV50	490.3(50)	HV2	19.61(2)	HV0.05	0.4903(0.05)
HV100	980.7(100)	HV3	29.42(3)	HV0.1	0.9807(0.1)

注:1. 维氏硬度试验可使用大于980.7 N(100 kgf)的试验力。

2. 显微维氏硬度试验的试验力为推荐值。

### 3. 试验条件与要求

- (1) 试验一般在10~35℃室温进行。对于温度要求严格的试验,温度为(23±5)℃。
- (2) 试样上下表面应平整,表面粗糙度应优于  $Ra 0.2 \mu m$ 。
- (3) 试样厚度至少为压痕对角线平均长度的1.5倍,试样最小厚度、试验力和硬度关系图见图8-31。
- (4) 对于曲面试样,根据压痕对角线平均长度  $d$  与试样面直径  $D$  的比值,按有关系数对测定值进行修正(相乘),详见 GB/T4340.1。
- (5) 试样厚度足够时,应尽量选用大载荷。
- (6) 载荷的施加和卸除应缓慢、平稳,不得冲击、振动。

(7) 试验力的保持时间为 10~15 s。对于特殊材料,试验力的保持时间可以延长,但应在试验结果中表示。

(8) 任一压痕中心距试样边缘距离,对于钢、铜及铜合金应不小于压痕对角线长度的 2.5 倍,对于轻金属、铅、锡及合金应不小于压痕对角线长度的 3 倍。

两相邻压痕中心之间距离,对于钢、铜及铜合金应不小于压痕对角线长度的 3 倍,对于轻金属、铅、锡及合金应不小于压痕对角线长度的 6 倍。如果相邻两压痕大小不同,应以较大压痕确定压痕间距。

(9) 对于小截面或外形不规则的试样,可将试样镶嵌或使用专用支承台进行试验。

(10) 在一般情况下,建议对每个试样报出三个点的硬度测试值。

#### 4. 维氏硬度表示方法

维氏硬度用符号 HV 表示, HV 前面为硬度值, HV 后面用数字表示试验力大小,再接下去用数字表示试验力保持时间(10~15 s 不标注)。

例如: 98.0 HV 10/20, 表示用 10 kgf(98.07 N) 试验力保持 20 s 测得维氏硬度值为 98.0。硬度值  $\geq 100$  时,取整数;硬度值在 10~100 时,取小数一位。

#### 5. 维氏硬度评定渗氮层脆性

脆性的评定方法,目前一般采用维氏硬度压痕法测定渗氮层脆性。具体试验条件,根据 GB/T11354《钢铁零件 渗氮层深度测度和金相组织检验》选用维氏硬度压头,根据需要选用试验力,一般选用试验力为 10 kgf(98.07 N)。

一般碳钢、低合金钢,如 40Cr、35CrMo 等渗氮后表层较浅脆性小,而典型的渗氮钢 38CrMoAl,由于含有铝元素,渗氮后硬度比较高,脆性比较大,故必须进行脆性检验。

在测定脆性时,应将零件表面用金相砂纸磨光,然后在维氏硬度计测得压痕。并根据压痕碎裂形状作为评定脆性等级的依据。其等级评定标准如下:

1 级——压痕边缘完整无缺; 2 级——压痕一边碎裂; 3 级——压痕二边碎裂; 4 级——压痕三边碎裂; 5 级——压痕四边均碎裂且轮廓不清。

一般零件规定为 1~3 级合格。对留有磨削量的零件,允许磨去加工余量,再评定脆性。

## 四、金属肖氏硬度试验

肖氏硬度试验是一种动载荷硬度试验法。标准冲头从一定高度落于试样表面,在其表面产生弹性变形和塑性变形。此时,冲头的冲击能量一部分转变成塑性变形功被试样所吸收,而另一部分则转变成弹性变形功被试样储存起来,当弹性变形恢复时,能量被释放出来,使冲头回跳到一定高度。

肖氏硬度值只能对弹性模数相同的材料进行比较,否则就会得到橡皮的肖氏硬度值比钢高的错误结果。

### 1. 试验原理

其原理是将规定形状的金刚石冲头从固定的高度  $h_0$  落在试样表面上,冲头弹起一定高度  $h$ ,用  $h$  与  $h_0$  的比值计算肖氏硬度值 HS。

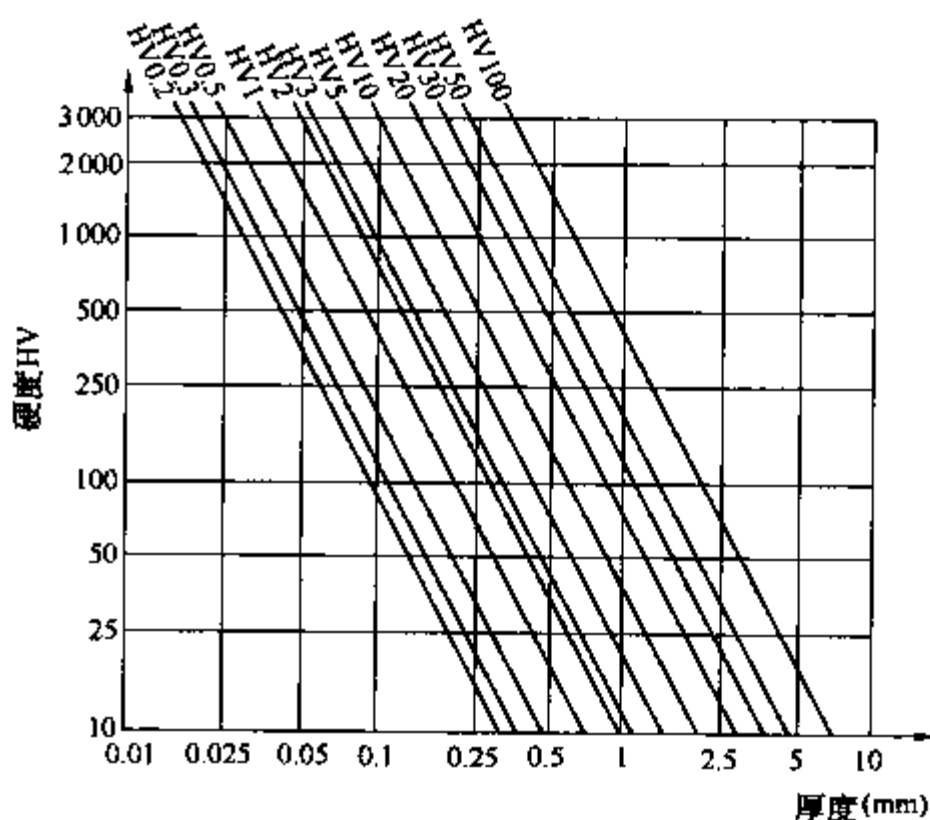


图 8-31 维氏硬度测试试样最小厚度—试验力—硬度关系图 (HV0.2~HV100)

$$HS = K \frac{h}{h_0}$$

式中  $K$ ——肖氏硬度系数;  
 $h_0$ ——冲头固定高度;  
 $h$ ——冲头回跳高度。

2. 试验条件与要求

- (1) 试样的试验面一般为平面,对于曲面试样,其试验面的曲率半径不应小于 32 mm。
- (2) 试样的质量应至少在 0.1 kg 以上,试样的厚度一般应在 10 mm 以上。
- (3) 试样不应带有磁性。试样的表面粗糙度  $Ra$  应小于  $1.6 \mu m$ 。
- (4) 试验前,应使用与试样硬度值接近的肖氏硬度标准块对硬度计进行校验。
- (5) 硬度计应安装在稳固的基础上,计测筒在测定时应保持垂直状态。试样的被测表面应与冲头作用方向垂直。需将计测筒从机架上取下以手提使用时,其测量结果应注明手提测量。
- (6) 试样两相邻压痕中心距离不应小于 1 mm,压痕中心距试样边缘的距离不应小于 4 mm。
- (7) 肖氏硬度值的读数应精确至 0.5 HS。
- (8) 以连续 5 次有效读数的平均值作为一个区域的肖氏硬度值。平均值计算按 GB/T8170 修约至整数。

3. 肖氏硬度的表示方法

肖氏硬度计有 C 型(目测型)硬度计和 D 型(指示型)硬度计两种。

例如: 25 HSC 表示用 C 型肖氏硬度计测定的肖氏硬度值为 25;

51 HSD 表示用 D 型肖氏硬度计测定的肖氏硬度值为 51。

## 五、金属里氏硬度试验

里氏硬度试验是用冲击体对试样表面冲击时的回跳速度与冲击速度的比值大小表示的一种测试方法,属于动载荷硬度试验法。在大型的不易搬动的工件上测定硬度时,经常采用里氏硬度试验。必要时,里氏硬度也可转化为其他硬度值。

1. 试验原理

用规定质量的冲击体在弹力作用下以一定速度冲击试样表面,用冲头(碳化钨材料)在距试样表面 1 mm 处的回跳速度与冲击速度的比值计算硬度值。计算公式如下:

$$HL = 1000 \frac{v_R}{v_A}$$

式中  $HL$ ——里氏硬度;  
 $v_R$ ——冲击体回跳速度;  
 $v_A$ ——冲击体冲击速度。

里氏硬度计可配置各种不同的冲击装置。检测时,冲头的运动速度由专门的传感器测得,并通过计算处理。由于冲头的回跳速度不仅与硬度相关,还与材质相关,因此,里氏硬度试验时,要确定“材料”参量。冲击装置的类型可分为 D 型、DC 型、G 型和 C 型,它的主要技术参数及适用条件见表 8-26,其中 D 型冲击装置为基本型,它可满足大部分硬度测试场合的要求。

表 8-26 里氏硬度计冲击装置的主要技术参数及适用条件

冲击装置	主要参数			稳定放置试件最小质量 (kg)	试件最小厚度 (mm)	适用硬度范围 HL	试件最大硬度
	冲击体质量(g)	冲击能量(N·m)	冲头直径(mm)				
D/DC 型	5.5/7.2	11.0	3	5	5	200~900	940 HV
G 型	20.0	90.0	5	15	10	300~750	650 HB
C 型	3.0	2.7	3	1.5	1	350~960	1000 HV

2. 试验条件与要求

- (1) 试样的试验面最好是平面,试验面应具有金属光泽。对 D 型、DC 型装置,试样表面粗糙度  $Ra$  应不大

于  $1.6 \mu\text{m}$ 。

(2) 试样不应带有磁性,并必须有足够的质量及刚性以保证在冲击过程中不产生位移和弹动。

(3) 试样应具有足够的厚度。

(4) 对于凹、凸圆柱面及球面试样, D 型、DC 型和 C 型冲击装置的表面曲率半径应不小于  $30 \text{ mm}$ ; G 型冲击装置的表面曲率半径应不小于  $50 \text{ mm}$ 。

(5) 试验前应使用相应的标准硬度块对里氏硬度计进行校验。

(6) 试验前应根据被测工件的材料,在硬度计上设定相应的参量。

(7) 试验前应预先设置试验方向,试验时将冲击装置支撑环紧压住试样表面上,冲击方向应与试验面垂直。

(8) 试样的每个部位一般进行五次试验。数据分散不应超过平均值的  $\pm 15 \text{ HL}$ 。

(9) 对 D 型、DC 型装置,任意两压痕中心之间距离不应小于  $3 \text{ mm}$ ,压痕中心距试样边缘的距离不应小于  $5 \text{ mm}$ 。

### 3. 里氏硬度的表示方法

(1) 用五个有效试验点的平均值作为一个里氏硬度试验数据。

(2) 应尽量避免将里氏硬度换算成其他硬度。必须时,可利用硬度计换算功能或参照现行标准 GB/T17394《金属里氏硬度试验方法》。

(3) 在里氏硬度符号 HL 前写硬度数值,在 HL 后面写冲击装置类型。

例如:  $700 \text{ HLD}$  表示用 D 型冲击装置测定的里氏硬度值为  $700$ 。

(4) 对于用里氏硬度换算的其他硬度,应在里氏硬度符号之前附以相应的硬度符号。

例如:  $400 \text{ HVHL}$  表示用 D 型冲击装置测定的里氏硬度值换算的维氏硬度值为  $400$ 。

对用其他冲击装置类型的硬度计,它的测试要求详见现行标准 GB/T17394《金属里氏硬度试验方法》。

## 六、其他硬度试验(努氏、韦氏)

### 1. 努氏硬度试验

努氏硬度试验是维氏硬度的进一步发展,也属压入法硬度试验的范畴。试验原理与维氏硬度相同。所不同的只是四角棱锥金刚石的两个对角不等,两长棱夹角为  $172.5^\circ$ ,两短棱夹角为  $130^\circ$ 。在试样上得到的是长对角线与短对角线之比达  $7.11$  倍的菱形压痕,见图 8-32。

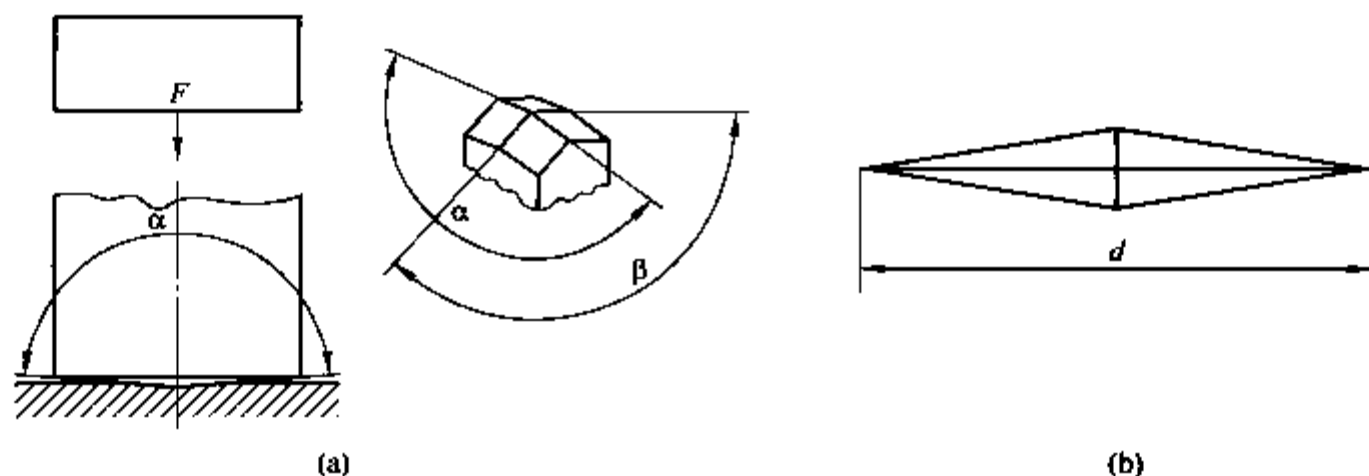


图 8-32 努氏硬度试验原理和压痕

(a) 努氏硬度压头; (b) 努氏硬度压痕

努氏硬度值是由单位压痕投影面积上所承受的试验力来定义的。将顶部两相对面具有规定角度的菱形棱锥体金刚石压头用试验力压入试样表面,经规定保持时间后卸除试验力,测量试样表面压痕长对角线的长度,用计算公式算出努氏硬度值或查阅标准 GB/T18449.1《金属努氏硬度试验 第 1 部分:试验方法》附录 A。

$$\text{HK} = 14.23 \frac{F}{d^2}$$

式中 HK——努氏硬度；

$F$ ——试验力(kgf)；

$d$ ——压痕长对角线长度(mm)。

努氏硬度试验推荐试验力的范围为  $98.07 \times 10^{-3} \sim 9.807 \text{ N}$  (10 g~1 kg)。

努氏硬度用 HK 表示,符号之前为硬度值,符号之后表示试验力的数字。

例如: 640 HK0.1 表示在试验力为 0.980 7 N(100 g)下保持 10~15 s 测定的努氏硬度值为 640; 640 HK 0.1/20 表示在试验力为 0.980 7 N(100 g)下保持 20 s 测定的努氏硬度值为 640。

测定努氏硬度的试样应按金相试样的要求制备。努氏硬度试验由于压痕细而长,而且只测量长对角线的长度,因而精确度较高。努氏硬度的测试更适用于测定极薄层(表面淬火、化学热处理渗层或镀层)区域硬度值的分布。此外,对测量精度和表面状态敏感程度很高,所以还广泛用来研究合金中各相的性能。

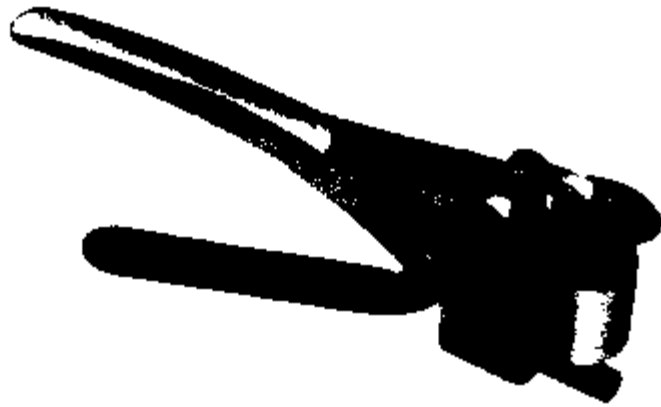


图 8-33 韦氏硬度计

## 2. 韦氏硬度试验

韦氏硬度计是一种压痕硬度计。在一定压力下,将压针压入试样的表面,压入的深度与材料的硬度成反比,即由压入深度转换成硬度。由于有色合金硬度较低,压入力较小,可实现手握加压,如图 8-33 所示。

韦氏硬度计压针头部形状为圆锥体、工件支承用砧座为圆柱状,两者间的间距大于 6 mm。表头的刻度范围为 0~20 HW。韦氏硬度计应配有标准硬度片,适用于有色金属、轻金属及合金的硬度测试。

## 七、各种硬度值之间的换算及硬度与强度的换算

在工件的硬度测试中尽量避免硬度之间的换算,但在实际工作情况下,受到试样热处理状态、大小、厚度及测试条件的限制,不可避免要进行硬度之间的换算。实践证明,特定材料的强度指标与其硬度指标存在着某种近似的对应关系,而对特定材料,采用不同硬度试验方法测出的硬度数据之间也存在着一定的近似换算关系。这些经验公式是通过大量的实验数据,用数学统计方法获得的,换算过程存在误差,因此换算结果仅供参考,现行的硬度强度换算的标准主要有: GB/T1172《黑色金属硬度及强度换算值》、GB/T3771《铜合金硬度与强度换算值》,标准都附有各种硬度与强度的对照表,铝合金硬度关系可参考 GB166。常见黑色金属各种硬度之间换算见本书附录七。

## 八、钢铁热处理件的硬度检验通则

硬度试验是为验证热处理工艺是否达到要求的主要测试手段,为使硬度检验结果可靠、可信、有相对可比性,对批量工件应有统一的抽样、取样方法,对检验部位、判据等有统一的规定。由此,中国热处理标准委员会组织制定了 JB/T6050《钢铁热处理零件硬度测试通则》标准,其中对硬度检验的主要要求有:

(1) 待检件应从热处理后的零件中选取,在特殊条件下,也可用与零件材料和状态相同的随炉试样,随炉试样的硬度不合格时,允许复检零件并以复检结果为准。

(2) 随炉试样不能用于仲裁检验。

(3) 特殊重要件一般应全部检验。

(4) 批量零件抽检硬度时,抽样率与取样方式应保证抽取的零件有代表性。

(5) 稳定生产的大批量零件一般按 GB/T2828.1 进行抽检。

(6) 对于不同的硬度检验对象,检验方法的选择见表 8-27。

(7) 检验部位应有代表性,在条件允许的情况下,应选择零件的工作部位或能反映工作部位的其他部位。正火、退火或淬火回火件在检验硬度前应首先磨去氧化、脱碳或增碳层。被检面应尽可能选择平面。

(8) 对待检件的每一处测试区域,应按图样或供货合同要求确定测试点数,试验点数一般不少于 3 点。

表 8-27 不同的硬度检验对象选用试验方法

硬度检验对象		表面硬度测试方法
表面硬化层	硬化深度 0.1~0.4 mm	小负荷或显微维氏硬度法
	硬化深度 0.4 mm 以上	表面洛氏硬度法(HR15N 或 HR30N)
小件(试块)	正火与退火件	一般为布氏硬度法
	淬火回火件	洛氏硬度法(HRC)或布氏硬度法
	感应淬火与火焰淬火件	一般为洛氏硬度(HRC), 淬火硬化层较浅时可用表面洛氏硬度法或维氏硬度法
大件(实物)	退火或调质态	锤击式布氏硬度测试法
	淬火、渗碳或渗氮态	肖氏硬度法、里氏硬度法等

注: 1. 铸件与锻件一般按布氏硬度试验方法测试。

2. 若确定的硬度试验方法有几种试验力可供选择, 应选用试验条件允许的最大试验力。

(9) 按 GB/T230.1《金属洛氏硬度试验 第1部分: 试验方法》、GB/T4340.1《金属维氏硬度试验 第1部分: 试验方法》进行测试, 在圆柱面或球面上测量的硬度值应按各自标准规定进行修正。

### 第三节 无损探伤

在不损伤工件、材料完好性的条件下, 检测其宏观缺陷的方法统称为无损检测。无损探伤的具体方法很多, 但主要可划归为超声探伤、磁粉探伤、渗透探伤、射线探伤及涡流探伤等五大常用技术, 在热处理工艺过程中常用前三项技术。每种探伤方法可探测的缺陷种类均有不同, 因此在实际工作中, 应根据对工件的具体要求来选择适合的探伤方法和工艺。常用五大探伤法的适用范围见表 8-28。

#### 一、磁粉探伤

在不损害原有工件状态的条件下, 磁粉探伤可发现工件表面及近表面的微小缺陷, 如裂缝、折叠缝、夹杂等。但这种方法只能应用于铁磁性材料的探伤, 对于有色金属、奥氏体钢等非磁性材料无法应用。

##### 1. 磁粉探伤的原理与磁化方法

1) 原理 磁化后的铁磁性材料如果在试样的表面或近表面存在某些与磁化方向成一定夹角的缺陷时, 则缺陷处会产生漏磁场, 这时, 把磁粉喷洒在试样表面, 在缺陷处就会堆集形成与缺陷大小和形状近似的磁痕。通过观察磁痕即可识别缺陷。

2) 铁磁性材料(工件)的磁化 磁粉探伤时, 使试件建立磁场的操作叫磁化。磁化方法的选择取决于试件形状、尺寸、检测要求, 缺陷方向及分布特点等。应使试件磁化方向尽量垂直于主要缺陷。磁化方法按磁化方向不同, 可分为周向磁化、纵向磁化和复合磁化三大类。

##### 2. 磁粉探伤的操作步骤

磁粉探伤工序包括: 预处理、磁化和施加磁粉、观察、记录以及后期处理等。

1) 预处理 用溶剂等把零件表面上的多种有碍于缺陷显示的杂物去掉, 以获得良好的缺陷显示表面。

2) 磁化 根据需要进行最佳的磁化方法与磁化强度以获得足够的检测灵敏度。

3) 施加磁粉 选择连续磁化法或剩磁法, 对工件进行探伤作业。

4) 磁粉痕迹的观察与判断 一般有两种方法, 一种凭经验, 一种借助于照片对比或用其他检验手段复验。各种缺陷磁痕的一般特征见表 8-29。

5) 后期处理 对检测后不允许有剩磁的工件, 探伤结束后需要退磁, 对工件表面残留的磁粉或悬液需进行清洗。

表 8-28 各种探伤方法适用范围

探伤方法	一般情况下					板材中			棒管中			铸件中			锻件中				焊缝中		加工中				使用中													
	表面微裂	一般表面裂纹	内裂	内部气孔	厚度	冶金变化	厚度	分层	气孔	裂纹	缩孔	翘皮	夹杂	冷隔	表面裂纹	疏松	气孔	泥芯	折叠	夹杂	内裂	白点	裂纹	夹杂	未熔合	气孔	未焊透	热裂	磨裂	疲劳裂纹	应力腐蚀	爆皮	减薄	腐蚀坑				
射线	X射线透照	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
	X射线荧光观察	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
超声波	放射性同位素	接触式	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		
		脉冲反射法	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
		表面波	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	液浸式脉冲反射法	直声束	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
		斜声束	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
		表面波	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
磁粉	穿透法	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	共振法	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	交流湿式	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	交流干式	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
涡流	直流湿式	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	直流干式	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
渗透	着色法	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
	荧光法	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	

检测能力优  
 不能检出  
 检测能力中等  
 检测能力差

表 8-29 缺陷磁痕的一般特征

缺陷名称	磁痕的一般特征
裂纹	清晰而浓密的曲折线状
锻造裂纹	磁痕聚集较浓,呈方向不定的曲线状或锯齿状;近表面锻裂产生不规则弥漫状磁痕。出现部位与工艺有关
热处理裂纹	磁痕明显,浓密较高,呈线状,棱角较多且尾部尖细。多出现在棱角、凹槽、变截面等应力集中部位
磨削裂纹	一般与磨削方向垂直,且成群出现,成网状或细平行线状
铸造裂纹	在应力最大的裂开部位较宽后变细
疲劳裂纹	按中间大、两边对称延伸的线状曲线分布,大多垂直于零件受力方向
焊接裂纹	多弯曲,两端有鱼尾状。焊缝下(近表面)裂纹形成较宽的弥漫状磁痕
白点	在圆的横截面上等圆周部位呈无规则分布,短柱线状
夹杂(与气孔)	单个或密集点状或片状,与缺陷具体形状相似
发纹	沿金属流线方向垂直线或微弯曲线状分布。表面发纹磁痕非常细小但轮廓明显

## 二、超声波探伤

超声检测是无损检测中最重要的方法之一,它对材料或结构中的不连续性缺陷,如裂纹、缩孔、白点等较敏感,对焊缝中的未焊透、脱粘等类结构缺陷也有一定检出能力,超声探伤的对象主要是锻件、焊缝、型材和形状不复杂、晶粒较细的铸件,不适用于对晶粒粗大的铸件与表面粗糙、形状复杂的工件进行作业。

### 1. 超声波探伤的原理

超声波按波形可分为纵波、横波和表面波三种。纵波可以在固体、气体与液体介质中传播,横波只在固体介质中传播,而表面波只能在固体表面进行传播。超声波传播时有类似光传播的特性,如超声波入射到异质界面时会发生反射、折射、透射等现象。超声波在铸、锻件中进行传播时,如遇到了不连续性的缺陷,部分声波就会被反射回来,被探伤仪接收,通过对反射波型位置、高低的分析,就能大致判断出缺陷在工件中的位置及缺陷的大小当量,这就是超声波探伤的基本理论依据。

### 2. 超声波探伤方法

1) 探伤方法分类 主要超声波探伤方法及其应用范围见表 8-30 所示。其中,以直探头探伤与斜探头探伤方法最为典型和常用,直探头探伤法与斜探头探伤法又可以分为几个小类,如图 8-34 与图 8-35 所示:

2) 探伤步骤 无论采用直探头探伤法、斜探头探伤法或是其他方法,探伤操作都可以分为三个程序:

(1) 探伤前准备:探伤前先根据被检试件的材质、厚度、加工工艺、表面状况以及探伤要求等具体情况确立探伤方法及探测条件,并对探伤面进行必要的清理与整修。

(2) 仪器调整:主要包括两个方面,一是调整仪器的显示屏上的水平轴线(即时基扫描线)与超声波声程成一定比例关系,确定水平基线的时间比例是最后对缺陷定位的关键步骤;二是调整探头与仪器的组合灵敏度,灵敏度的高低决定了对缺陷的分辨率。

(3) 缺陷检测与分析:根据探伤要求,按规定的探伤方法、扫查方式在被探试件表面指定的扫查范围内移动探头进行探测。当缺陷大小超过标准规定或人为设定的需记录的最小缺陷当量或指示长度时,探伤人员应

表 8-30 探伤方法和应用范围

探伤方法	应用对象
直探头探伤	钢坯、铸件、板材、圆钢
斜探头探伤	焊缝、管材
双晶探头探伤	板材、细棒、管材
水浸聚焦探头探伤	管材、细棒
板波探头探伤	板材
穿透法探头探伤	薄带、板材等衰减大的材料



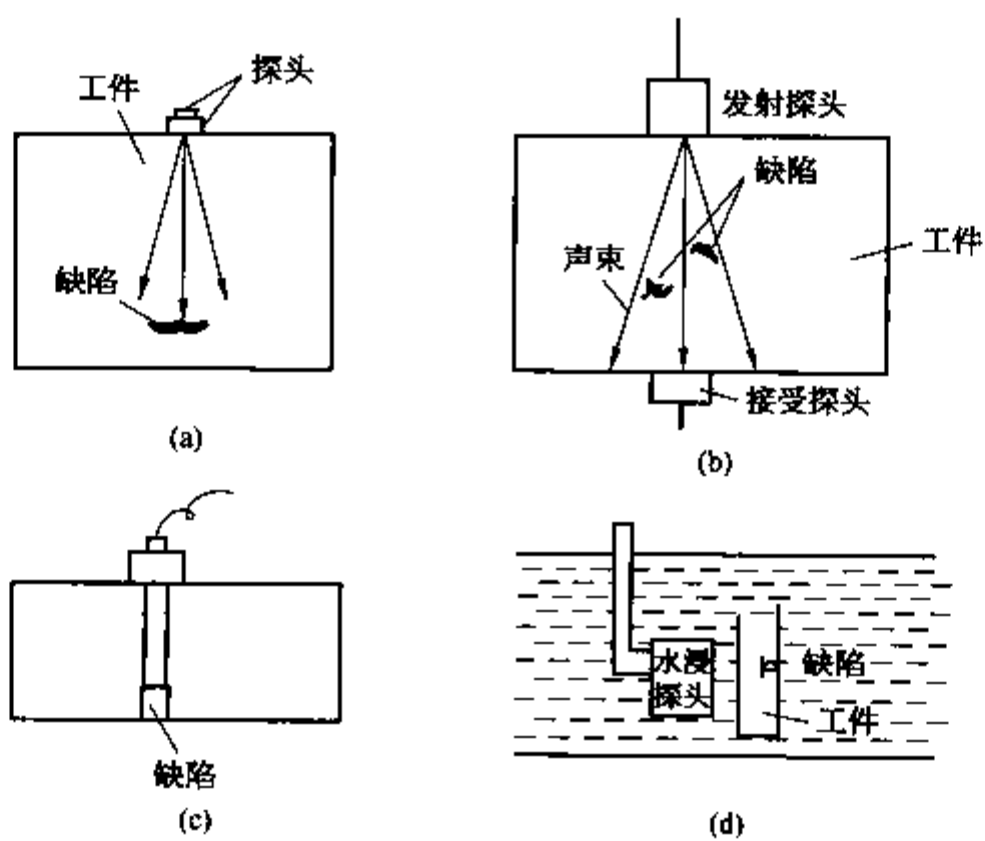


图 8-34 几种典型的直探头探伤方法示意图

(a) 脉冲反射法；(b) 脉冲穿透法；(c) 直接接触法；(d) 流浸法

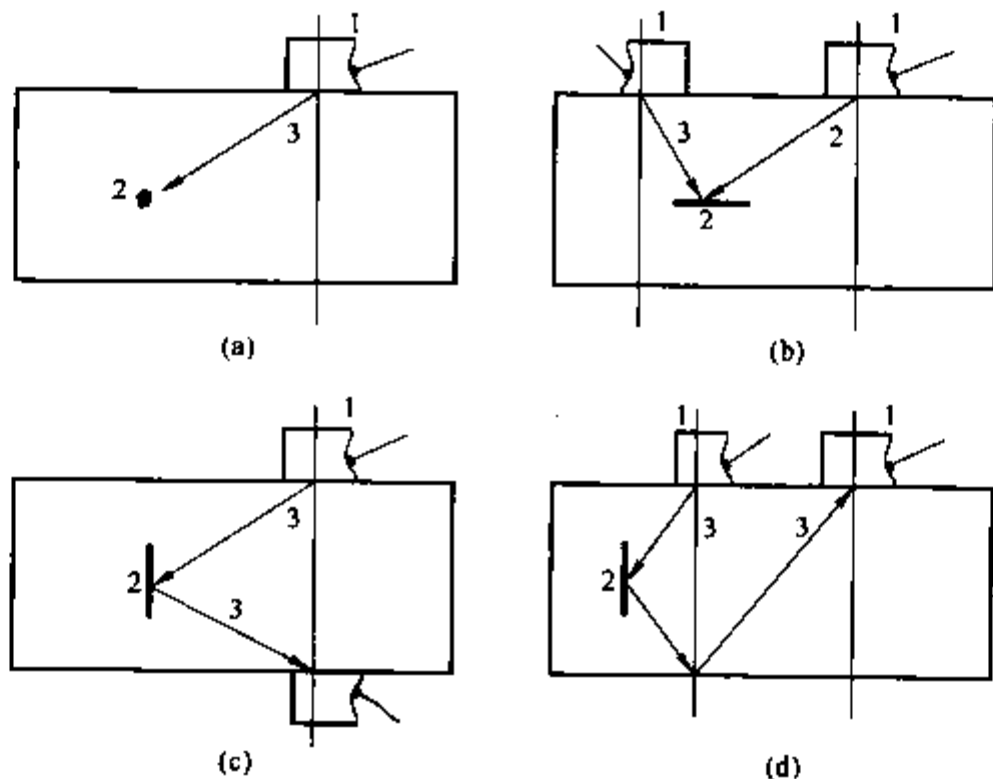


图 8-35 几种典型的斜探头超声波探伤方法示意图

(a) 单探头法；(b) V形排列双探头法；  
 (c) K形排列双探头法；(d) 串列式双探头法；  
 1—发射、接收探头；2—试件中缺陷；3—超声波声束

该对缺陷波数据进行记录,并根据示波屏上伤波位置、幅值及波形特征等对缺陷进行定位、定量及定性评价。

### 三、渗透探伤

渗透探伤是基于毛细管作用来检查表面缺陷的无损探伤方法。探伤时先将具有良好渗透能力的、由一定染料配制而成的渗透剂喷涂在试件表面上,待其渗入缺陷内部后,再清除附在探伤面上的多余渗透剂并施加显

像剂,使渗入缺陷内的渗透剂在试件表面上形成缺陷的扩大图像,可将细微的表面缺陷显示出来。

渗透探伤适用于非多孔性材料在表面开口缺陷的检验,不仅可检查黑色和有色金属,而且可检查陶瓷、粉末冶金、玻璃、塑料、有机合成材料及其制品。渗透探伤的主要特点是不受试件的形状、大小、组织结构、化学成分以及缺陷方向等因素影响,对外形复杂的小型试件可在一次检查操作中查出整个表面上各个方向的缺陷。渗透探伤可发现最小宽度为 0.1 mm 的缺陷,但试件表面的粗糙度对探伤效果影响较大。

依渗透探伤所用渗透剂的种类,渗透探伤方法可分为荧光渗透探伤和着色渗透探伤两大类,见表 8-31;依显像方式,可分为干式显像法、湿式显像法和无显像剂显像法三种。

表 8-31 渗透法分类和方法代号

渗透探伤方法分类	方法名称	方法代号	渗透探伤方法分类	方法名称	方法代号
荧光渗透探伤	水洗型荧光渗透探伤	FA	着色渗透探伤	水洗型着色渗透探伤	VA
	后乳化型荧光渗透探伤	FB		后乳化型着色渗透探伤	VB
	溶剂去除型荧光渗透探伤	FC		溶剂去除型着色渗透探伤	VC

渗透探伤基本步骤一般可分为五步:预清洗→渗透→清洗→显像→检验。当采用不同的渗透探伤方法和渗透探伤剂时,可相应地增加乳化、干燥和后处理等一个或几个步骤。

根据探伤对象、探伤条件及缺陷的种类的不同,应选择不同的探伤方法以求最理想的效果,见表 8-32 所示:

表 8-32 渗透探伤方法的选择

检查对象	渗透探伤方法					
	FA	FB	FC	VA	VB	VC
细小裂纹、宽浅裂纹、粗糙度低的零件		○			○	
疲劳裂纹		○	○			
小型零件的批量检查	○			○		
大型零件的批量检查			○			○
粗糙面检查	○			○		
无暗室、明亮的探伤场所				○		○
无水电的探伤场所						○

注:○表示可选择的方法。

## 第四节 金相分析与评定

### 一、取样与制作

#### 1. 金相试样的选取准则

金相检验是研究金属及合金内部组织的重要方法之一,是验证热处理质量好坏的重要手段。要进行金相检验,首先要选择合适的有代表性的金相试样。常规检验可按相关技术标准规定要求取样,失效件的检验可在损坏的地方与完整的部位分别截取试样以作比较,结合其他检测手段探究其失效的原因。

金相试样截取部位确定以后,还必须确定检验面的方向,常取横向截面或纵向截面,横向试样即试样磨面为与轧(锻)制方向垂直的截面;纵向试样即试样磨面为与轧(锻)制方向平行的截面。两种截面上有不同的检测内容,见表 8-33。

表 8-33 横向、纵向试样检测内容一览表

检验面方向	检测内容
横向试样	试样自中心至边缘部分组织的变化情况
	表面缺陷及其深度的检验,如表面裂纹、脱碳、氧化、过烧、折叠等
	表面处理及其深度的检验,如表面化学热处理(渗碳、碳氮共渗、渗氮)、表面淬火处理、腐蚀层、表面渗层、镀层处理等
	非金属夹杂物在整个截面上的分布情况
	晶粒度的大小
	碳化物的网状分布情况
纵向试样	非金属夹杂物的数量、大小和形状
	钢材的带状组织及通过热处理消除带状组织的效果
	因塑性变形引起晶粒或组织变形的情况,从而了解材料冷变形的程度
	共晶碳化物的不均匀度情况

## 2. 金相试样的截取方法

金相试样的大小应便于握持及磨制,较理想的形状尺寸是磨面面积小于  $400 \text{ mm}^2$ ,高度  $15 \sim 20 \text{ mm}$  的圆柱体或长方体。

从被检测的金属材料和零件上截取金相试样可用手锯、砂轮切割机、电火花切割机、剪切、锯、钋、车、铣等截取,必要时也可用气割法截取。金相实验室里最常用的是手锯和薄片砂轮切割。未经热处理的钢材、普通铸铁以及有色金属可用手锯切取,也可用薄片砂轮切割机切取;淬火处理后的钢材,常用切割砂轮切取。切割时,要注意冷却,特别是用砂轮切割机时,需要有充分的冷却液进行冷却。硬而脆的金属可以用锤击法取样,拣出合适的形状和尺寸的试样,或者进行镶嵌。

无论采用何种方法截取试样,都应避免试样因截割加工不当而引起的显微组织变化,如淬火马氏体组织试样,若切割时冷却不当,过热发生回火形成回火马氏体组织;低碳钢、有色金属中晶粒因受力而拉长、压缩、扭曲;奥氏体类钢在外力作用下晶粒内部滑移线增加出现形变孪晶等。这就要求在截取试样过程中试样受热、受外力作用尽量小。

对于表面处理及其深度的检验,取样时应注意切割面与轴线垂直。

## 3. 夹持与镶嵌

当选取好的试样过小或过薄(如金属碎片、钢丝、钢带、钢针、小钢球等)不易握持,或要对表面处理、表面缺陷等边缘组织试样进行检验,因此要保护试样边缘,或者试样要在自动磨光和自动抛光机上进行自动研磨、抛光时,要对试样进行夹持或镶嵌,所选用的夹持与镶嵌方法均不得改变原始组织。

1) 夹持法 夹持法即利用预先制作好的夹具装置,把外形比较规则的圆柱体、薄板等细小试样夹在相应的夹具中。这些夹具比较简单,可自制,一般分为圆环状试样夹具和板形试样夹具,见图 8-36。利用机械夹持可将几片试样夹在一起,中间可用铜皮隔开,以保护试样边缘。试样与夹具间应紧密接触。

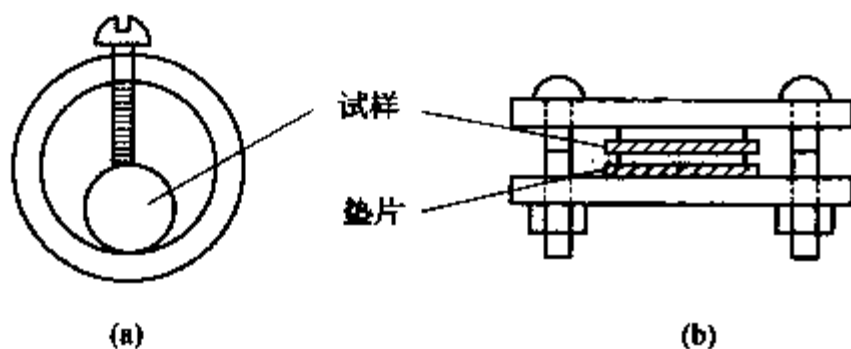


图 8-36 金相试样机械夹持夹具

2) 镶嵌法 镶嵌是把试样镶嵌入塑料胶木、树脂或低熔点金属,通过加热加压或固化剂作用等方法,使试样与镶嵌料紧密接触。具体方法见表 8-34 所列。

表 8-34 镶嵌方法一览表

镶嵌方法		应用说明
树脂镶嵌法	热压镶嵌法	树脂(胶木)用镶嵌器加热、加压→冷却固化
	浇注镶嵌法(冷镶嵌)	室温下使镶嵌料固化,适用于对温度变化敏感或熔点较低不允许加热的试样、不宜受压的软的试样、形状复杂的试样、多孔性试样等
特殊镶嵌法	真空冷镶嵌法	适用于多孔样品,如裂纹样品、易脆样品、脆性材料等,可保证塑料填满孔洞
	倾斜镶嵌法	适用于存在扩散层、渗层、镀层等的薄层试样,可以放大镀层在一个方向上的厚度
	电镀保护镶嵌法	适用于细线材、异型件、断口或受检处为刃口等的试样,通常在镶嵌之前先电镀,可电镀铜、铁、镍、金、银等金属

#### 4. 金相试样的制样

经切割或经切割、镶嵌后得到的金相试样,再经过磨制和抛光,得到磨面平整光滑,没有磨痕和变形层的金相试样,用适当的化学或物理方法对试样抛光面进行浸蚀的过程称为制样。不同的组织、不同位向的晶粒,以及晶粒内部与晶界处受到不同程度的浸蚀,从而在金相显微镜下可清晰地显示出金属与合金的内部组织。对于表面处理及其深度的检验,制样时应防止表面倒角。制样过程见表 8-35,常用化学浸蚀剂见表 8-36。

表 8-35 制样过程一览表

制样程序	可选方法	操作说明	设备	辅料
粗磨	机械或手工	一般在砂轮机上进行,磨时要注意接触压力不宜过大,且需用水冷却试样,使金相试样的组织不因受热而发生变化。一些较软的材料如铜、铝等有色金属,不宜在砂轮机上磨制,而应该用锉刀整修锉平。经过粗磨可以把金相试样磨面整修平整,为下一道砂纸的磨制做好准备	砂轮机	锉刀
细磨	手工磨光	手工磨光是把经粗磨后的试样放在垫有平的玻璃或金属板的砂纸上进行磨制,可按试样软硬程度选择由粗到细数道砂纸。从粗砂纸到细砂纸,每换一次砂纸时,试样均须转 90°角与旧磨痕成垂直方向,向一个方向磨至旧磨痕完全消失,新磨痕均匀一致时为止。最后只留有极细的磨痕,为试样磨面的抛光做好准备		由粗到细不同号数的金相砂纸(0→4号)
	机械磨光	将由粗到细数道砂纸分别置于机械磨样机上,或以不同粒度的金刚砂镶嵌于磨盘、铅盘或其他盘上依次磨制	机械磨样机	由粗到细不同号数的水砂纸、磨盘、铅盘等
抛光	机械抛光(粗→细)	将经砂纸磨光的试样在装有抛光织物的抛光盘上进行抛光,抛光时用力要轻,须从盘的中心至边缘来回抛光,并不时滴加少许磨粉悬浮液。一般抛光到试样的磨痕完全除去,表面像镜面时为止	抛光机	抛光织物(丝绒等)、抛光料(金刚石悬浮液等)
	电解抛光	电解抛光基于阳极溶解原理,样品为阳极,不锈钢板或其他材料为阴极。电解抛光的条件由电压、电流、温度、抛光时间来确定	电解抛光装置	电解抛光液(特配)
	化学抛光	化学抛光是靠化学试剂对试样表面不均匀溶解,逐渐得到光亮表面的。但化学抛光只能使样品表面光滑,不能达到表面平整的要求		化学抛光液(特配)

(续表)

制样程序	可选方法	操作说明	设备	辅料
浸 蚀	化学浸蚀	化学试剂与试样表面起化学溶解或电化学溶解的过程,以显示金属的显微组织		化学浸蚀剂
	电解浸蚀	试样作为电路的阳极,浸入合适的电解浸蚀液中,通入较小电流进行浸蚀,以显示金属显微组织,可在电解抛光后随即降压进行浸蚀	同电解抛光装置	电解浸蚀剂(特配)
	特殊显示组织的方法	为特殊需要,可采用特殊显示组织的方法,主要有:阴极真空浸蚀、恒电位浸蚀、薄膜干涉显示组织(化学浸蚀形成薄膜法、真空蒸发镀膜法、离子溅射镀膜法)及热染法等	特种设备	

表 8-36 常用化学浸蚀试剂一览表

名 称	成 分	适 用 范 围
硝酸酒精溶液	硝酸 2~4 mL 酒精 100 mL	显示碳钢及低合金钢、铸铁的组织
盐酸苦味酸酒精溶液	盐酸 5 mL 苦味酸 1 g 酒精 100 mL	显示淬火及淬火回火后钢的晶粒和组织
三氯化铁盐酸水溶液	三氯化铁 5 g 盐酸 50 mL 水 100 mL	显示奥氏体不锈钢组织及铜合金组织
三氯化铁盐酸酒精溶液	三氯化铁 5 g 盐酸 2 mL 水 96 mL	显示铜合金组织
硫酸铜盐酸水溶液	硫酸铜 4 g 盐酸 20 mL 水 20 mL	显示不锈钢组织及渗氮钢渗氮层深度

## 二、非金属夹杂物含量测定

钢中非金属夹杂物,如氧化物、硫化物、硅酸盐、氮化物等都呈独立相存在,主要是由脱氧产物和钢凝固时由于一系列物化反应所形成的各种夹杂物组成。非金属夹杂物作为独立相存在钢中,破坏了钢基体的连续性,使钢组织的不均匀性增大。一般来说钢中非金属夹杂物对钢的性能产生的是不良影响,因此评定钢中夹杂物类别、级别对保证钢材质量、防止开裂十分重要。

### 1. 常用标准

GB/T10561《钢中非金属夹杂物含量的测定——标准评级图显微检验法》;ISO4967《钢中非金属夹杂物含量的测定——标准评级图显微检验法》。

上述标准适用范围:压缩比大于或等于 3 的轧制或锻制钢材中的非金属夹杂物。

### 2. 取样位置

钢材外表面到中心的中间位置的纵向截面。

### 3. 夹杂物类型

上述实际生产应用标准中按形态把钢中非金属夹杂物分为 A、B、C、D、DS 五大类,其中又把 A~D 类按夹杂物粗、细分为两类分别评定,用字母 e 表示粗系的夹杂物,分类及评定方法等见表 8-37。

表 8-37 夹杂物分类及评定一览表

类 型		形 态	评 定 方 法
A类 (硫化物类) (图 8-37)	粗系	具有高的延展性、有较宽范围形态比(长度/宽度)的单个灰色夹杂物,一般端部呈圆角,由长度及多少分为 3 级	A 法: 应检验整个抛光面。对于每一类夹杂物,按细系和粗系记下与所检验面上最恶劣视场相符合的标准图片的级别数 B 法: 应检验整个抛光面,最少检验 100 个视场。试样每一视场同标准图片相对比,每类夹杂物按细系或粗系记下与检验视场最符合的级别数
	细系		
B类 (氧化铝类) (图 8-38)	粗系	大多数没有变形、带角的、形态比小(一般小于 3)、黑色或带蓝色的颗粒,沿轧制方向排成一行(至少有 3 个颗粒),由颗粒多少分为 3 级	
	细系		
C类 (硅酸盐类) (图 8-39)	粗系	具有高的延展性,有较宽范围形态比(一般 $\geq 3$ )的单个呈黑色或深灰色夹杂物,一般端部呈锐角,由长度及多少分为 3 级	
	细系		
D类 (球状氧化物类) (图 8-40)	粗系	不变形、带角或圆形的、形态比小(一般小于 3)、黑色或带蓝色的、无规则分布的颗粒,由颗粒多少分为 3 级	
	细系		
DS类(单颗粒球状类) (图 8-41)		圆形或近似圆形、直径 $\geq 13 \mu\text{m}$ 的单颗粒夹杂物,由颗粒大小分为 3 级	

4. 评定结果表示

常用 A 法应对照 GB/T10561 标准的附录 A(参考图 8-37~图 8-41),记录每类夹杂物和每个宽度系列夹杂物最恶劣视场相符合的级别。

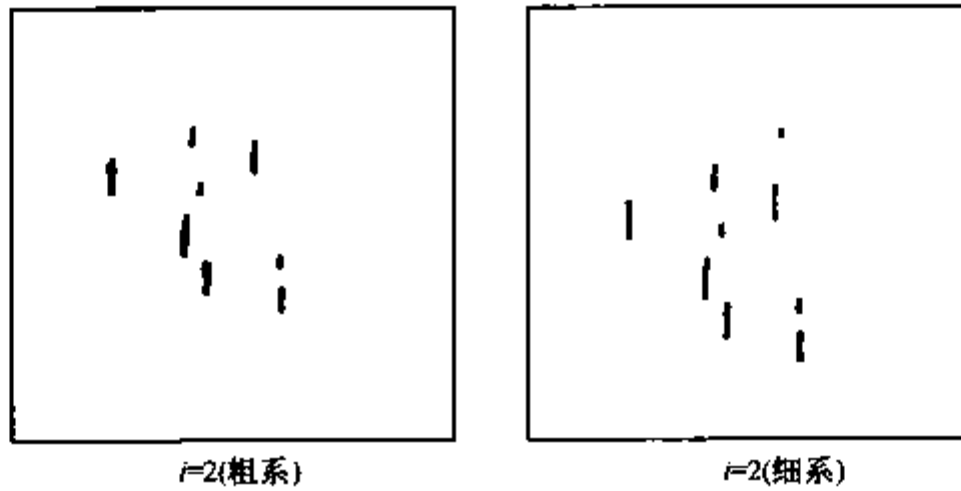


图 8-37 A 类(硫化物类)夹杂物(2 级)级别图 100×(×0.6)

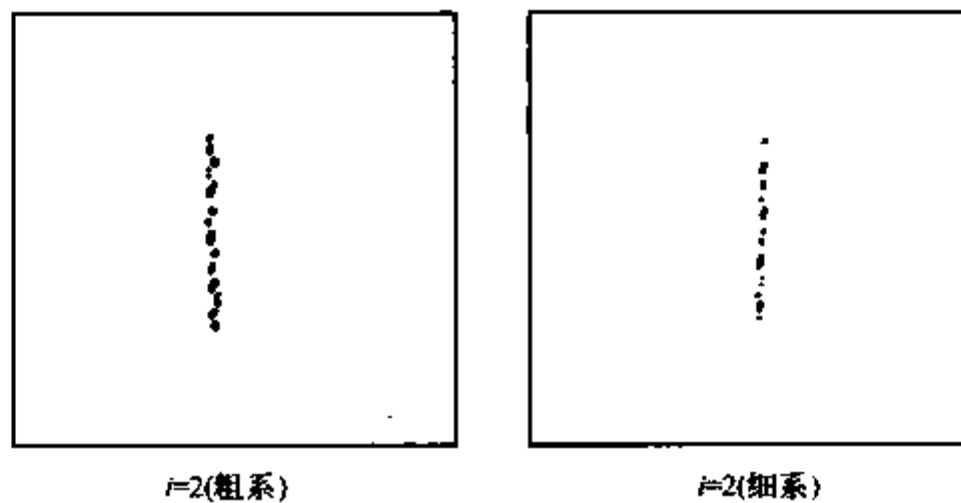


图 8-38 B 类(氧化铝类)夹杂物(2 级)级别图 100×(×0.6)

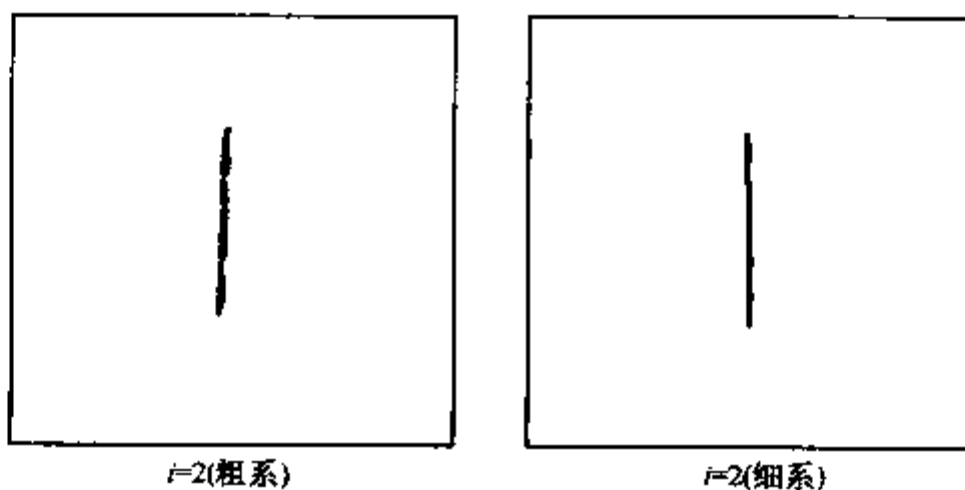


图 8-39 C类(硅酸盐类)夹杂物(2级)级别图 100×(×0.85)

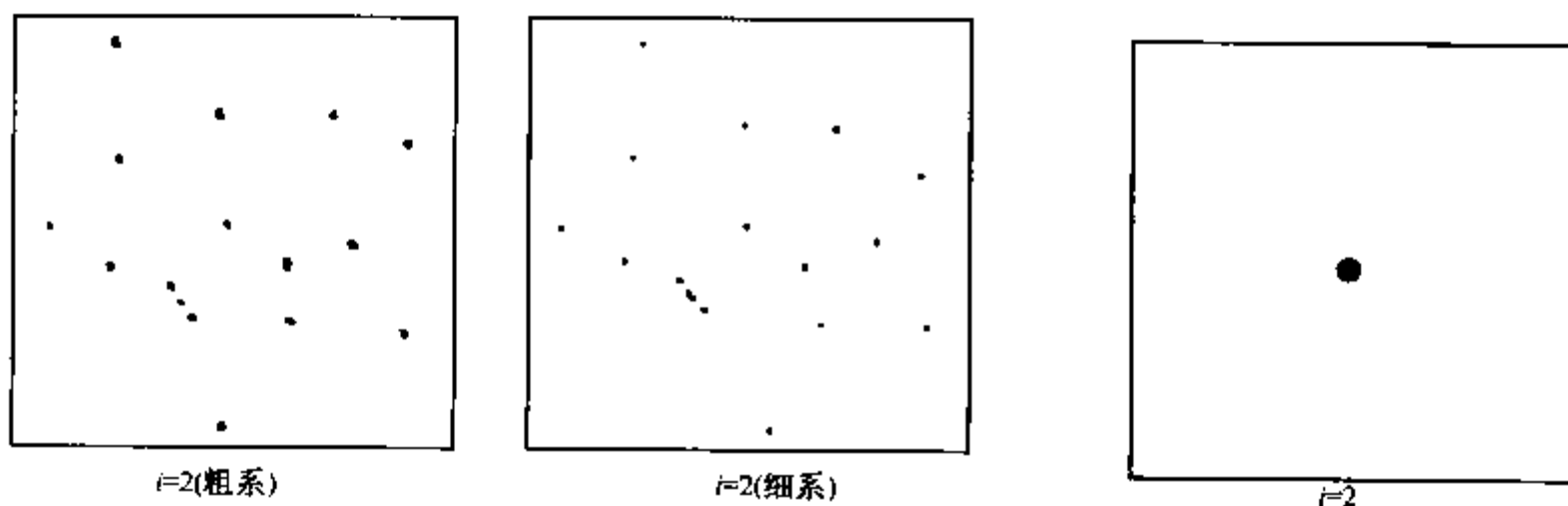


图 8-40 D类(球状氧化物类)夹杂物(2级)级别图 100×(×0.85)

图 8-41 DS类(单颗粒球状类)夹杂物(2级)级别图 100×(×0.85)

### 三、金属材料晶粒度评定

晶粒度是表示晶粒大小的一种尺度。对钢来说,晶粒度一般是指奥氏体化后的实际晶粒大小,即钢材经过不同的热处理操作后冷却到室温下所得到的晶粒。一般来说,在常温下使用的金属材料,晶粒越细,不仅强度、硬度越高,而且塑性、韧性也好。在 100 倍下  $645.16 \text{ mm}^2 (1 \text{ in}^2)$  面积内包含的晶粒个数  $N$  与显微晶粒度级别数  $G$  有如下关系:

$$N = 2^{G-1}$$

如 8 级( $G=8$ )晶粒度时,上述面积内约有 128 颗晶粒(也为 ASTM 晶粒度级别)。

#### 1. 常用标准

GB/T6394《金属平均晶粒度评定方法》;ASTM E112《测定平均晶粒度试验方法》。

上述标准适用范围:金属组织、晶粒形状与评级图相似的非金属材料。

#### 2. 晶粒度测定方法

晶粒度测定在金相试样上进行,晶粒度的显示可根据钢种按标准规定操作。检测方法见表 8-38。

表 8-38 晶粒度测定方法

方法类别	测定方法	用途
比较法	通过与标准系列评级图对比来评定平均晶粒度	检验常用方法
面积法	通过计算给定面积网格内的晶粒数 $N$ 来测定晶粒度	
截点法	通过计数给定长度的测量线段(或网格)与晶粒边界相交截点数 $P$ 来测定晶粒度	仲裁的方法

### 3. 评定结果表示

日常检验常用比较法对照相应标准系列评级图(放大倍率为 100 倍)直接进行对比,结果用晶粒度级别数表示。若采用其他放大倍数,则可通过表 8-39 进行换算。

表 8-39 晶粒度级别和放大倍数的关系

图像的放大倍数	晶 粒 度 级 别									
	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
50										
100	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
200	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
400	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

### 4. 高速工具钢用 Snyder-Graff 晶粒度测定方法

高速工具钢的原始奥氏体晶粒度级别通常为 9~12 级。晶粒度从 9 级变化到 12 级,单位面积内的晶粒数将增加近 10 倍,而平均线截距长度由 14.1 μm 减小至 5 μm,但晶粒度级别只改变 3 个单位。高速工具钢晶粒的细化能显著改变其性能,因此常需精确测定其晶粒度。Snyder 和 Graff 提出了一个改进后的截数法。

浸蚀好的样品用 1000× 的放大倍数观察,测试线为长度 127 mm 的直线;有些样品可用 500× 的放大倍数并用 63.5 mm 的测试线,然后测量被直线截割的晶粒数。10 个这样的测量数据的平均值就是 Snyder-Graff 截割数,以 S-G 表示。晶粒度级别 G 与 S-G 晶粒号间存在以下函数关系:

$$G = [6.635 \lg(S-G)] + 2.66$$

图 8-42 为 ASTM 晶粒度级别与截数法 Snyder-Graff 晶粒号的对应曲线,由图中曲线可找出 ASTM 的值与相对应的 Snyder-Graff 的值。

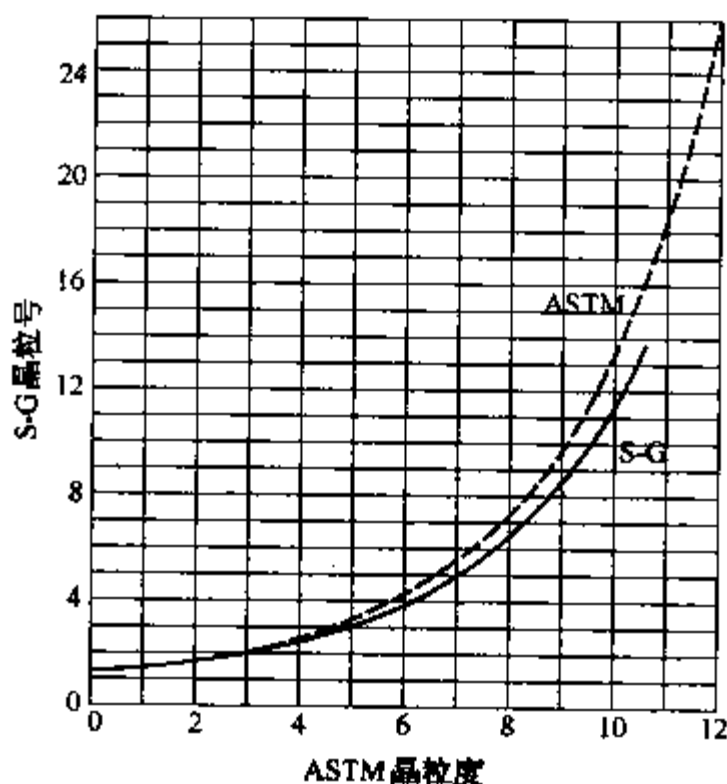


图 8-42 ASTM 晶粒度级别与截数法 Snyder-Graff 晶粒号的对应曲线

## 四、带状组织(偏析)评定

在经热加工后的亚共析钢显微组织中,铁素体与珠光体沿压延变形方向交替成层分布的组织,成为带状组织。带状组织使钢材的力学性能产生各向异性,即沿着带状纵向的强度高、韧性好,横向的强度低、韧性差。此外,带状组织的工件热处理时易产生畸变,且使得硬度不均匀。

### 1. 常用标准

GB/T13299《钢的显微组织评定方法》。

上述标准适用范围:低碳、中碳钢的钢板、钢带和型材。

### 2. 带状组织评定方法

评定珠光体钢中的带状组织,要根据带状铁素体数量,并考虑带状贯穿视场的程度、连续性和变形铁素体晶粒多少确定。上述标准按钢材碳的质量分数分为 A、B、C 三系列,每系列中按偏析程度分为 0~5 级,5 级最严重,由试样 100 倍视场的相应图片对照评定。各系列、各等级对应的带状组织特征见表 8-40 所示。图 8-43 为各系列 4 级带状组织评级图。



表 8-40 带状组织

级别	组 织 特 征		
	A 系列( $\omega_c \leq 0.15\%$ 钢)	B 系列( $\omega_c: 0.16\% \sim 0.30\%$ 钢)	C 系列( $\omega_c: 0.31\% \sim 0.50\%$ 钢)
0	等轴的铁素体晶粒和少量的珠光体,没有带状	均匀的铁素体—珠光体组织,没有带状	均匀的铁素体—珠光体组织,没有带状
1	组织的总取向为变形方向,带状不很明显	组织的总取向为变形方向,带状不很明显	铁素体聚集,沿变形方向取向,带状不很明显
2	等轴铁素体晶粒基体上有 1~2 条连续的铁素体带	等轴铁素体晶粒基体上有 1~2 条连续的和几条分散的等轴铁素体带	等轴铁素体晶粒基体上有 1~2 条连续的和几条分散的等轴铁素体—珠光体带
3	等轴铁素体晶粒基体上有几条连续的铁素体带穿过整个视场	等轴晶粒组成几条连续的贯穿视场的铁素体—珠光体交替带	等轴晶粒组成的几条连续铁素体—珠光体的带,穿过整个试场
4	等轴铁素体晶粒和较粗的变形铁素体晶粒组成贯穿视场的交替带	等轴晶粒和一些变形晶粒组成贯穿视场的铁素体—珠光体均匀交替带	等轴晶粒和一些变形晶粒组成贯穿视场的铁素体—珠光体均匀交替带
5	等轴铁素体晶粒和大量较粗的变形铁素体晶粒组成贯穿视场的交替带	变形晶粒为主构成贯穿视场的铁素体—珠光体不均匀交替带	变形晶粒为主构成贯穿视场的铁素体—珠光体不均匀交替带

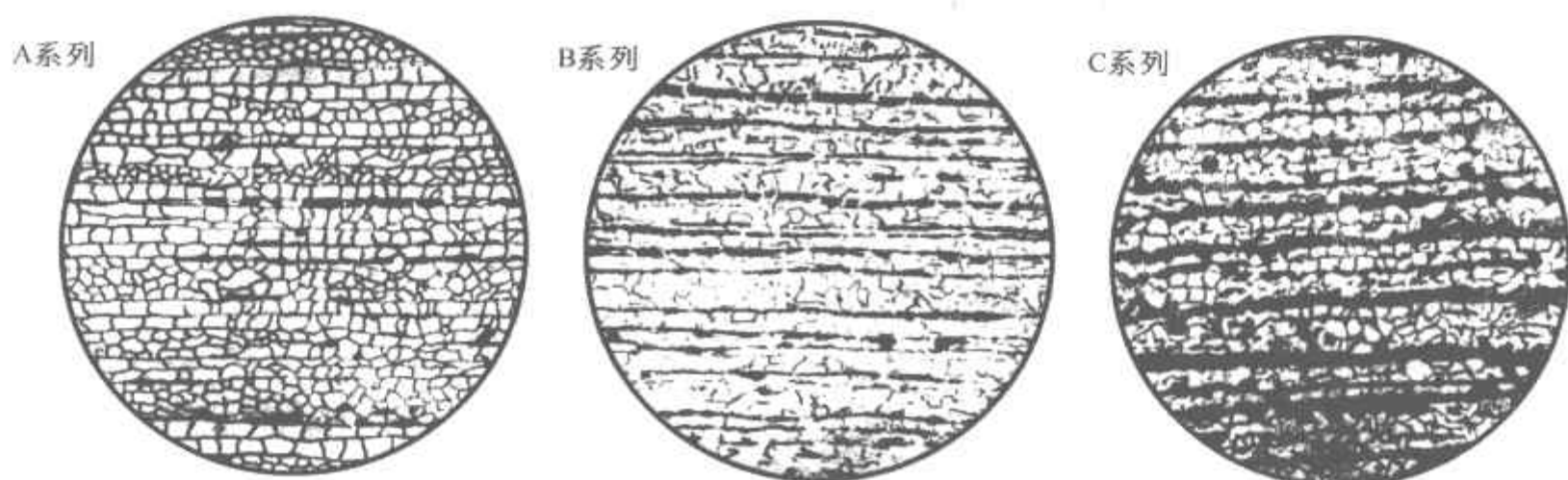


图 8-43 各系列 4 级带状组织评级图 100×(×0.6)

## 五、魏氏组织评定

亚共析钢在铸造、锻造、轧制、焊接和热处理时,由于高温形成粗大奥氏体,在冷却时游离铁素体除沿晶界呈网状析出外,还有一部分呈针状自晶界伸入晶内或在晶粒内部独自析出,而不与晶界铁素体网相连,这种针状组织称为魏氏组织。魏氏组织出现为钢材过热的金相特征,将造成钢的力学性能,尤其是冲击性能的下降,严重的将造成零件在使用过程中的脆性断裂。

### 1. 常用标准

GB/T13299《钢的显微组织评定方法》。

上述标准适用范围:低碳、中碳钢的钢板、钢带和型材。

### 2. 魏氏组织评定方法

评定珠光体钢过热后的魏氏组织,要根据析出的针状铁素体数量、尺寸和自由铁素体网确定的奥氏体晶粒大小确定。上述标准按钢材碳的质量分数分为 A、B 两系列,每系列中按魏氏分布的严重程度分为 0~5 级,5 级最严重。试样在 100 倍下的视场由相应图片对照评定。各系列、各级别对应的魏氏组织特征见表 8-41 所示。图 8-44 为各系列 4 级魏氏组织评级图。

表 8-41 魏状组织

级别	组 织 特 征	
	A 系列( $\omega_C \leq 0.30\%$ 钢)	B 系列( $\omega_C: 0.31\% \sim 0.50\%$ 钢)
0	均匀的铁素体和珠光体组织,无魏氏组织特征	均匀的铁素体和珠光体组织,无魏氏组织特征
1	铁素体组织中,有呈现不规则的块状铁素体出现	铁素体组织中出现碎块状及沿晶界铁素体网的少量分叉
2	呈现个别针状组织区	出现由晶界铁素体网向晶内生长的针状组织
3	由铁素体网向晶内生长,分布于晶粒内部的细针状魏氏组织	大量晶内细针状及由晶界铁素体网向晶内生长的针状魏氏组织
4	明显的魏氏组织	大量的由晶界铁素体网向晶内生长的长针状的魏氏组织
5	粗大针状及厚网状的非常明显的魏氏组织	粗大针状及厚网状的非常明显的魏氏组织

A系列



B系列

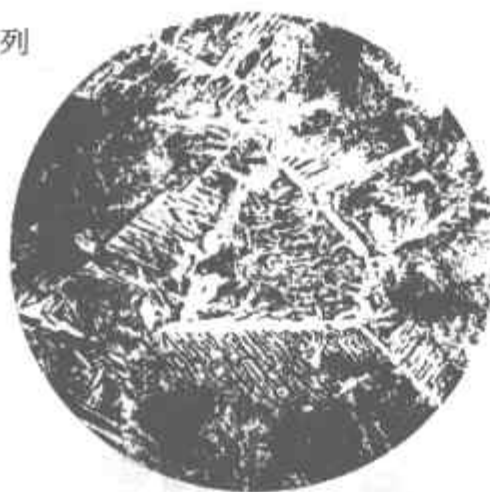


图 8-44 各系列 4 级魏氏组织评级图 100×(×0.6)

## 六、球粒状珠光体(球化体)评定

钢经球化退火后,获得均匀分布的小球状珠光体,能降低钢的硬度、改善切削加工性能,并为以后的热处理做好准备。

具有片状珠光体的钢材硬度高、切削性能差、加工后表面粗糙,当进行热处理时工具变形较大,且容易造成过热。产生片状珠光体的原因主要是退火工艺不良或温度控制不准确,例如加热温度不足、保温时间过短均会使钢得不到均匀的球状组织,而出现细片或点状的珠光体。如果加热温度太高,则造成钢材过热,出现粗片状珠光体及网状碳化物。对于球化不良的钢,可再经球化退火处理。

各钢种球化体评定的常用标准和依据见表 8-42。

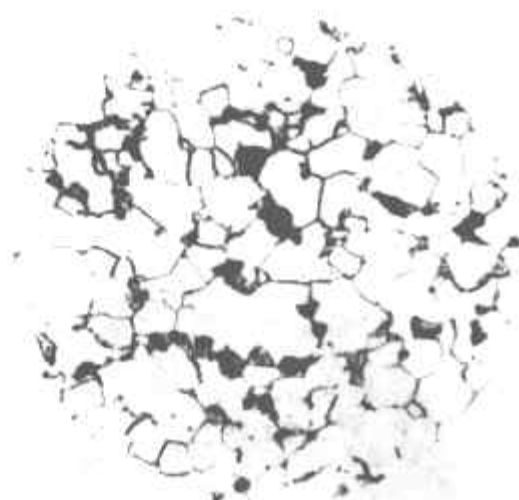
表 8-42 各钢种球化退火后球化体组织评定标准依据一览表

钢 种	采 用 标 准	球化体级别评定方法
低碳结构钢、低碳合金结构钢、中碳结构钢、中碳合金结构钢及易切削结构钢	JB/T5074《低、中碳钢球化体评级》	球化体组织级别根据其组织的形态、数量、大小及分布情况,根据化学成分对照相应图片评定(三个分级图),各分 6 级(图 8-45、图 8-46、图 8-47)
GCr15、GCr15SiMn、GCr15SiMo、GCr18Mo 钢(滚动轴承零件)	JB/T1255《高碳铬轴承钢滚动轴承零件热处理技术条件》	球化体组织(退火组织)级别根据碳化物的尺寸、数量及形状,对照相应图片评定,分 6 级(图 8-48)
T7、T8、T8Mn、T9、T10、T11、T12 和 T13 钢(碳素工具钢)	GB/T1298《碳素工具钢技术条件》	球化体组织(珠光体组织)级别根据碳化物的尺寸、数量及形状,对照相应图片评定,分 6 级(图 8-49)

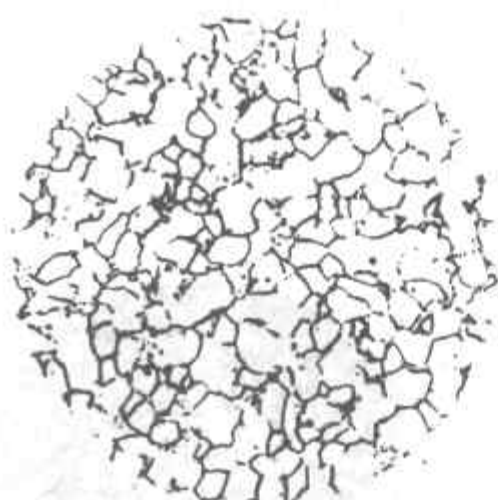
(续表)

钢 种	采 用 标 准	球化体级别评定方法
9SiCr, Cr2, CrWMn, 9CrWMn, Cr06, W 和 9Cr2 钢	GB/T1299《合金工具钢》	球化体组织(珠光体组织)级别根据碳化物的尺寸、数量及形状,对照相应图片评定,分6级(图8-50)

评定时,在金相试样上,一定倍率下(500倍或400倍),球化体组织级别根据其组织的形态、数量、大小及分布情况,并对照标准图片进行评定。

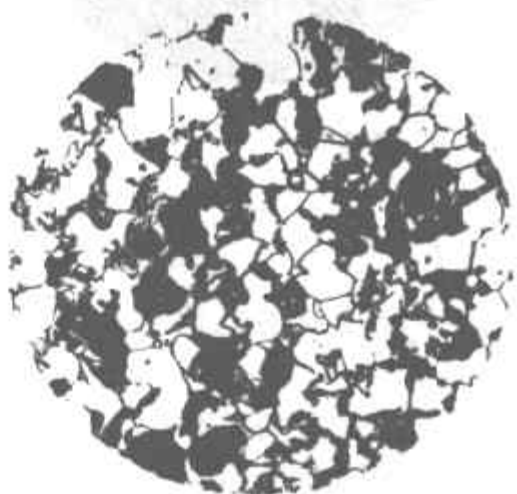


1级(组织特性:珠光体+铁素体)

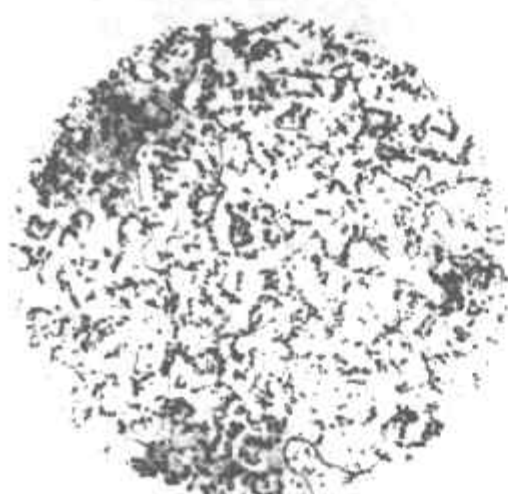


6级(组织特性:球化体+铁素体)

图8-45 JB/T5074 低碳结构钢及低碳合金结构钢部分球化体组织分级图 400×(×0.7)

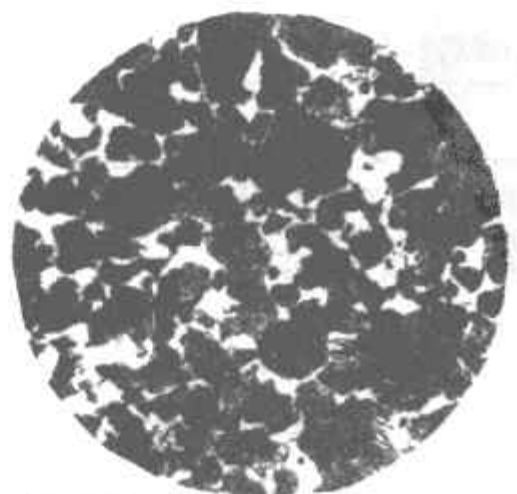


1级(组织特性:珠光体+铁素体)

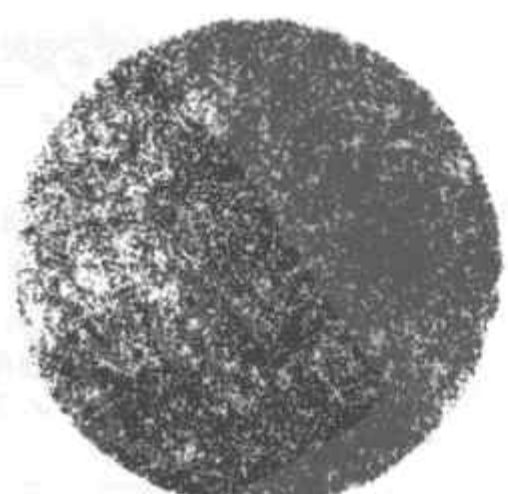


6级(组织特性:均匀分布球化体+铁素体)

图8-46 JB/T5074 中碳结构钢部分球化体组织分级图 400×(×0.7)



1级(组织特性:珠光体+铁素体)



6级(组织特性:均匀分布球化体+铁素体)

图8-47 JB/T5074 中碳合金结构钢部分球化体组织分级图 400×(×0.7)



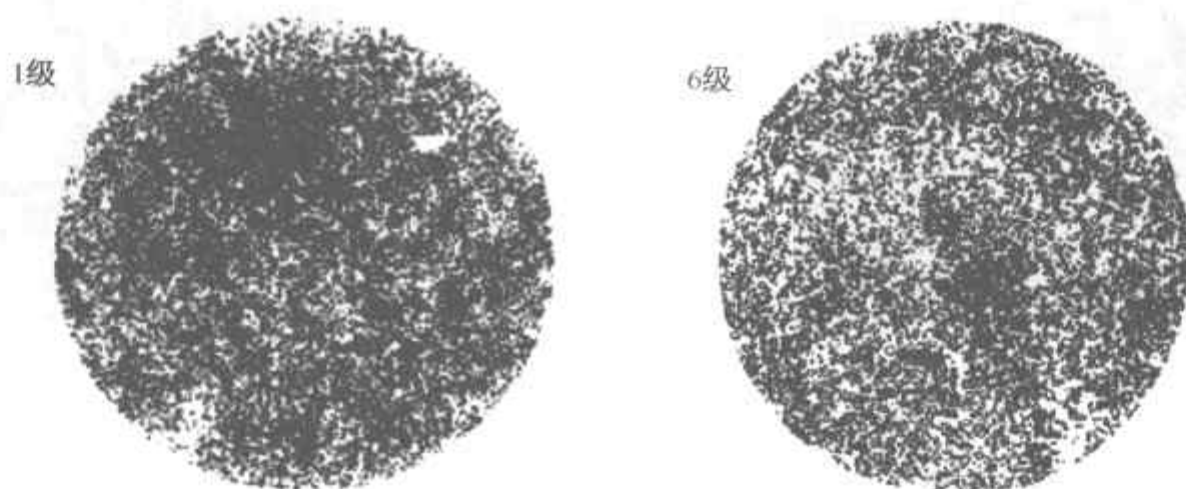


图 8-48 JB/T1255 部分球化体组织(退火组织)级别图  $500\times(\times 0.6)$

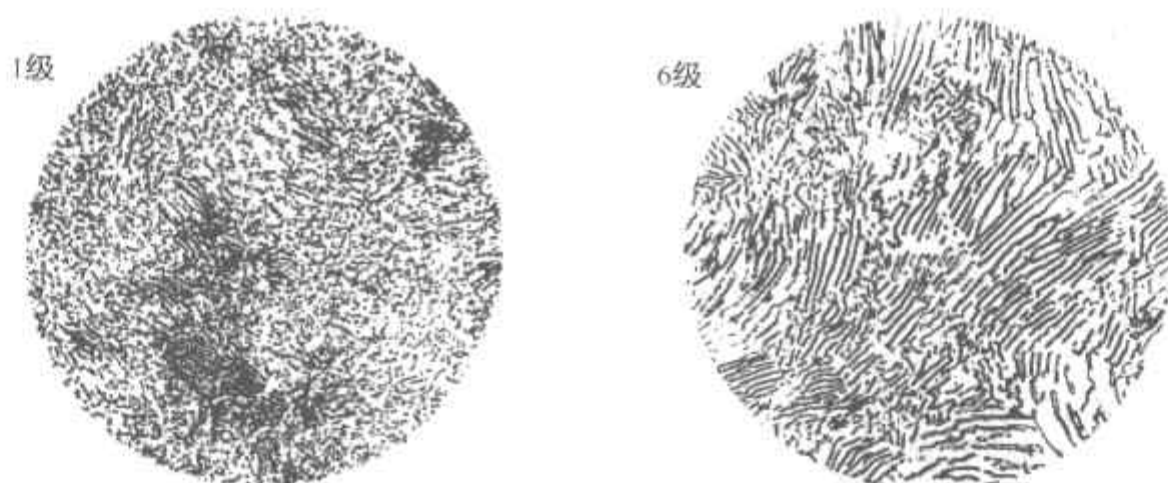


图 8-49 GB/T1298 部分球化体组织(珠光体组织)级别图  $500\times(\times 0.6)$

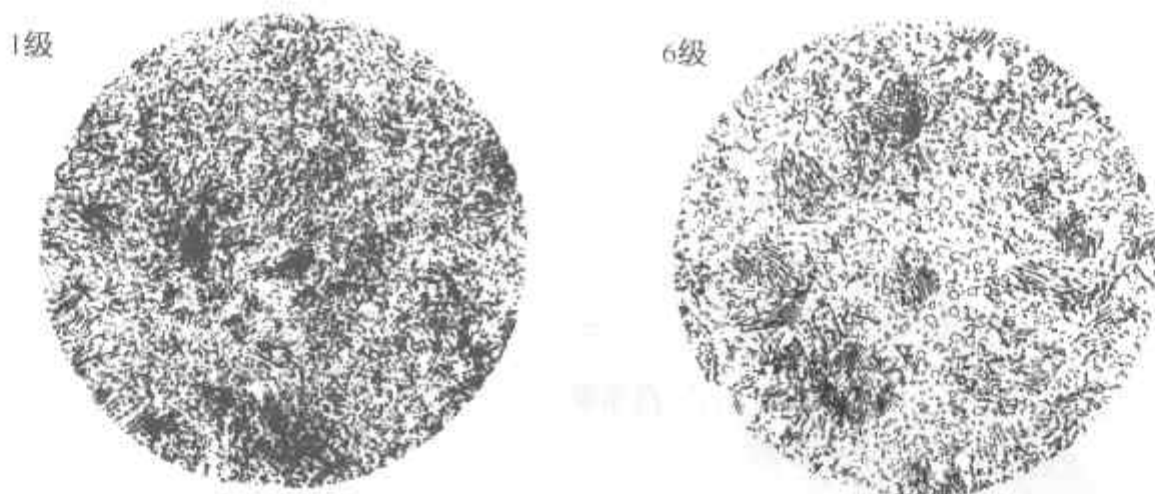


图 8-50 GB/T1299 部分球化体组织(珠光体组织)级别图  $500\times(\times 0.6)$

## 七、马氏体组织评定

钢经淬火处理或淬火、低温回火( $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ )后得到马氏体组织。马氏体形态主要为板条状马氏体(低碳马氏体,见图 8-51)、针状马氏体(高碳马氏体,见图 8-52)。马氏体的粗细或长短(大小)对性能有很大影响,热处理工艺中常要对其控制。具体钢种、具体工艺不同,马氏体组织的评定方法不相同。



图 8-51 板条状马氏体 500×(×0.4)



图 8-52 针状马氏体 500×(×0.4)

各钢种、各工艺下马氏体组织评定的常用标准及方法见表 8-43。

表 8-43 各钢种、各工艺下马氏体组织评定标准及方法

钢种、工艺	采用标准	马氏体级别评定方法
中碳钢、中碳合金结构钢淬火后	JB/T9211《中碳钢与中碳合金结构钢马氏体等级》	马氏体组织级别按粗细及长度,对照图片评定,分 8 级,最细 1 级,最粗 8 级(图 8-53)
Cr12 型钢淬火回火后	JB/T7713《高碳高合金钢制冷作模具显微组织检验》	马氏体组织级别按粗细及长度,对照图片评定,分 5 级,最细 1 级,最粗 5 级(图 8-54)
5CrNiMo、5Cr4W5Mo2V、3Cr2W8V、3Cr3Mo3W2V、4Cr5MoSiV、4Cr3Mo2NiVNbB 钢淬火后	JB/T8420《热作模具钢显微组织评级》	马氏体组织级别按粗细及长度,对照图片评定,分 6 级,最细 1 级,最粗 6 级(图 8-55)
GCr15、GCr15SiMn、GCr15SiMo、GCr18Mo 钢制滚动轴承零件淬火、回火后	JB/T1255《高碳铬轴承钢滚动轴承零件热处理技术条件》	马氏体组织级别按粗细及长度,对照图片评定,分 5 级,最细 1 级,最粗 5 级(图 8-56)
20CrMnTi、20CrMnMo、20CrNi2Mo、20CrNi3Mo、15CrNi3Mo、20Cr2Ni4 等钢制重载渗碳齿轮渗碳、淬火后	JB/T6141.3《重载齿轮 渗碳金相检验》	渗层马氏体组织级别按粗细及长度,对照图片评定,分 6 级,最细 1 级,最粗 6 级(图 8-57)
08F、Q215AF、Q235AF、10、15、20、20Cr、20CrMnMo 等低碳和低合金钢的零件经碳氮共渗或渗碳层深度小于或等于 0.3 mm 时	JB/T7710《薄层碳氮共渗或薄层渗碳钢件显微组织检测》	渗层马氏体组织级别按粗细及长度,对照图片评定,分 5 级,最细 1 级,最粗 5 级(当渗层显微组织主要为针状马氏体时,见图 8-58;当渗层显微组织主要为板条马氏体时,见图 8-59)
汽车用钢制渗碳齿轮渗碳、淬火后	QC/T262《汽车渗碳齿轮金相检验》	渗层马氏体组织级别按粗细及长度,对照图片评定,分 8 级,最细 1 级,最粗 8 级(图 8-60)
汽车钢制碳氮共渗齿轮碳氮共渗、淬火后	QC/T29018《汽车碳氮共渗齿轮金相检验》	渗层马氏体组织级别按粗细及长度,对照图片评定,分 8 级,最细 1 级,最粗 8 级(图 8-61)
中碳碳素结构钢和中碳合金钢制造的机械零件高、中频感应淬火后	JB/T9204《钢件感应淬火金相检验》	表层马氏体组织级别按粗细及长度,对照图片评定,分 10 级,最粗 1 级,最细 10 级(图 8-62)

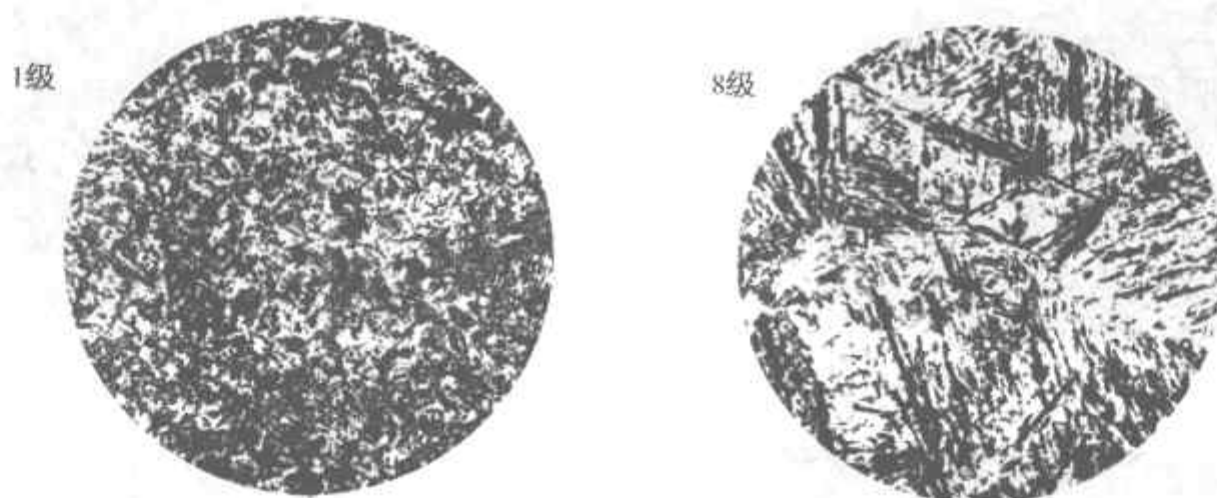


图 8-53 JB/T9211 部分马氏体组织级别图 500×(×0.65)



图 8-54 JB/T7713 部分马氏体组织级别图 500×(×0.65)



图 8-55 JB/T8420 部分马氏体组织级别图 500×(×0.5)

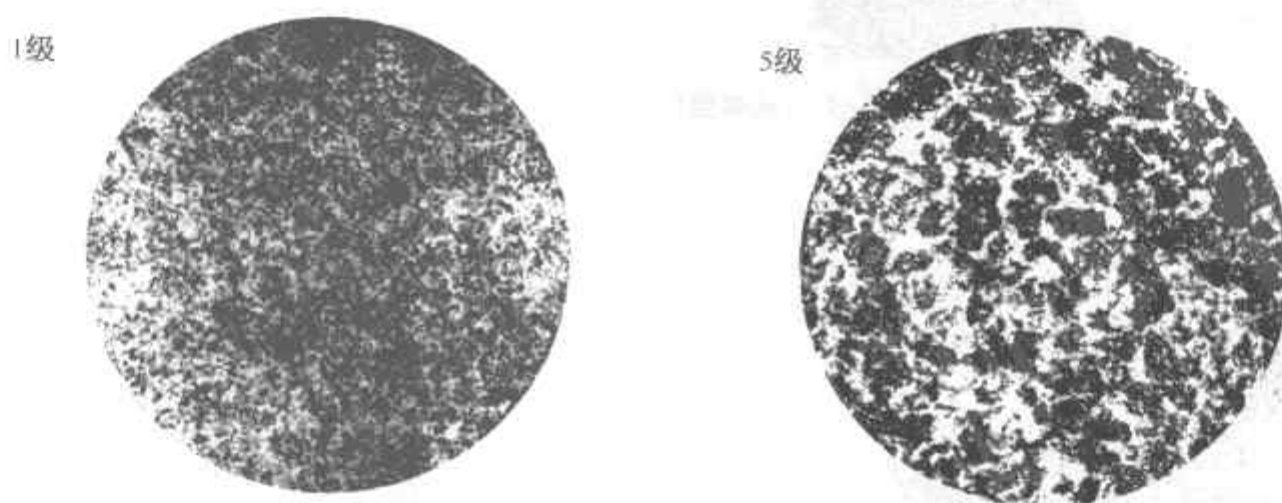


图 8-56 JB/T1255 部分马氏体组织级别图 500×(×0.65)





图 8-57 JB/T6141.3 部分马氏体组织及残留奥氏体级别图 400×(×0.7)



图 8-58 JB/T7710 部分马氏体组织及残留奥氏体级别图 400×(×0.6)



图 8-59 JB/T7710 部分马氏体组织级别图 400×(×0.6)



图 8-60 QC/T262 部分马氏体组织及残留奥氏体级别图 400×(×0.6)



图 8-61 QC/T29018 部分马氏体组织及残留奥氏体级别图 400×(×0.6)



图 8-62 JB/T9204 部分马氏体组织级别图 400×(×0.55)

评定时,在金相试样上,一定倍率下(500倍或400倍),针状马氏体常用测量针叶长度并对照标准图片进行评定,中碳马氏体主要用对照法。

## 八、残留奥氏体含量评定

工件淬火冷却至室温后残存的奥氏体称残留奥氏体。残留奥氏体属韧性相,同时又是不稳定相,在一定条件下会继续向马氏体转变,因此其含量对工件的使用性能有较敏感的影响。具体评定方法因钢材、工艺而异。

要相对较精确地测定残留奥氏体含量(如科研、工艺评定需要),常采用X射线衍射仪,根据衍射的相对强度可求得相对含量。实际生产中则采用金相对照法评定残留奥氏体含量或含量级别。评定时放大倍率一般为500倍或400倍,但国外标准常在1000倍下评定。

### 1. X射线衍射法测定残留奥氏体含量

用X射线衍射仪可以测出小于1%的残留奥氏体量,同时可以在不损坏钢体表面的情况下进行工作。在中碳淬火钢中,如将其可能存在的微量碳化物忽略不计,则可以看作是马氏体和残留奥氏体两金属相的混合体。用X射线衍射法测定其中残留奥氏体量的方法主要有两种:一种叫外标法,是比较待测试样及标准样品的衍射花样中某相应的奥氏体衍射线条的强度。另一种叫内标法,是直接比较所测试样的同一衍射花样中残留奥氏体和马氏体的相邻衍射线条的累积强度,可求出试样中残留奥氏体的含量,它比较方便和准确。具体送样应按照具体X衍射仪要求。

### 2. 常用金相法残留奥氏体评定标准及方法

各钢种、工艺条件下残留奥氏体金相评定常用标准见表8-44。

表 8-44 残留奥氏体含量评定标准依据

钢种、工艺	采用标准	残留奥氏体评定方法
20CrMnTi、20CrMnMo、20CrNi2Mo、20CrNi3Mo、15CrNi3Mo、20Cr2Ni4等钢制重载渗碳齿轮渗碳、淬火后	JB/T6141.3《重载齿轮渗碳金相检验》	渗层奥氏体组织级别按含量多少,对照图片评定,分6级,最少1级(5%~8%),最多6级(约55%)(图8-57)
08F、Q215AF、Q235AF、10、15、20、20Cr、20CrMnMo等低碳和低合金钢的零件经碳氮共渗或渗碳层深度小于或等于0.3mm时	JB/T7710《薄层碳氮共渗或薄层渗碳钢件显微组织检测》	渗层奥氏体组织级别按含量多少,对照图片评定,分5级,最少1级(<3%),最多5级(约40%)(图8-58)
汽车用钢制渗碳齿轮渗碳、淬火后	QC/T262《汽车渗碳齿轮金相检验》	渗层奥氏体组织级别按含量多少,对照图片评定,分8级,最少1级(<5%),最多8级(约50%)(图8-60)
汽车用钢制碳氮共渗齿轮碳氮共渗、淬火后	QC/T29018《汽车碳氮共渗齿轮金相检验》	渗层奥氏体组织级别按含量多少,对照图片评定,分8级,最少1级(<5%),最多8级(约56%)(图8-61)

评定时,在经正常浸蚀的金相样品上,在一定倍率(500倍或400倍)下,对照相应标准中的图片评定,一般



与马氏体级别同时评定。评定中,试样浸蚀的不足或过度均会影响评定结果,应注意控制。

## 九、碳化物级别评定

在碳钢中,由碳和铁化合而形成渗碳体,当钢中碳和合金元素含量较高时,可能形成合金渗碳体或合金碳化物。碳化物硬度很高(800~1 000 HV),脆性很大,塑性和冲击韧度几乎为零。碳化物形态有片状、粒状、网状、带状等,是钢中的主要硬化相,其形态、大小、分布和数量对于钢的性能影响很大。不同钢种、不同工艺条件下对碳化物的评定不尽相同,生产中一般采用金相法按相关标准进行评定。

各钢种、各工艺条件下碳化物级别评定所采用标准及评定法见表 8-45。

表 8-45 碳化物级别评定标准依据一览表

钢种、工艺	采用标准	碳化物评定方法
经过压力加工变形的莱氏体型高速工具钢、合金工具钢、高碳铬不锈钢轴承钢、高温轴承钢和高温不锈钢轴承钢(共晶碳化物不均匀度的显微评定)	GB/T14979《钢的共晶碳化物不均匀度评定法》	依据钢类及规格分别选用六套评级图,对于共晶碳化物呈网状形态的,主要考虑网的变形、完整程度及网上碳化物的堆积程度;对于共晶碳化物呈条带形态的,主要考虑条带宽度及带内碳化物的聚集程度,对照图片评定,均分 8 级,最少 1 级,最严重 8 级(图 8-63)
高碳铬轴承钢淬火处理后(碳化物不均匀性检验)	GB/T18254《高碳铬轴承钢》	碳化物网状级别按碳化物聚集程度及聚网程度,对照图片评定,分 3 级,最少 1 级,最严重 3 级(图 8-64) 碳化物带状级别按碳化物聚集程度、大小和形状,对照图片评定,分 4 级,最少 1 级,最严重 4 级(图 8-65) 碳化物液析级别按碳化物聚集程度、大小和形状,对照图片评定,分 4 级,最少 1 级,最严重 4 级(图 8-66)
20CrMnTi、20CrMnMo、20CrNi2Mo、20CrNi3Mo、15CrNi3Mo、20Cr2Ni4 等钢制的重载渗碳齿轮渗碳、淬火后	JB/T6141.3《重载齿轮 渗碳金相检验》	渗层碳化物级别按碳化物多少及形态、分布,对照图片评定,分 6 级,最少 1 级,最严重 6 级(图 8-67)
汽车用钢制渗碳齿轮渗碳、淬火后	QC/T262《汽车渗碳齿轮金相检验》	渗层碳化物级别按碳化物多少及形态、分布,对照图片评定,分 8 级,最少 1 级,最严重 8 级(图 8-68)
汽车用钢制碳氮共渗齿轮碳氮共渗、淬火后	QC/T29018《汽车碳氮共渗齿轮金相检验》	渗层碳氮化合物级别按碳化物多少及形态、分布,对照图片评定,分 7 级,最少 1 级,最严重 7 级(图 8-69)

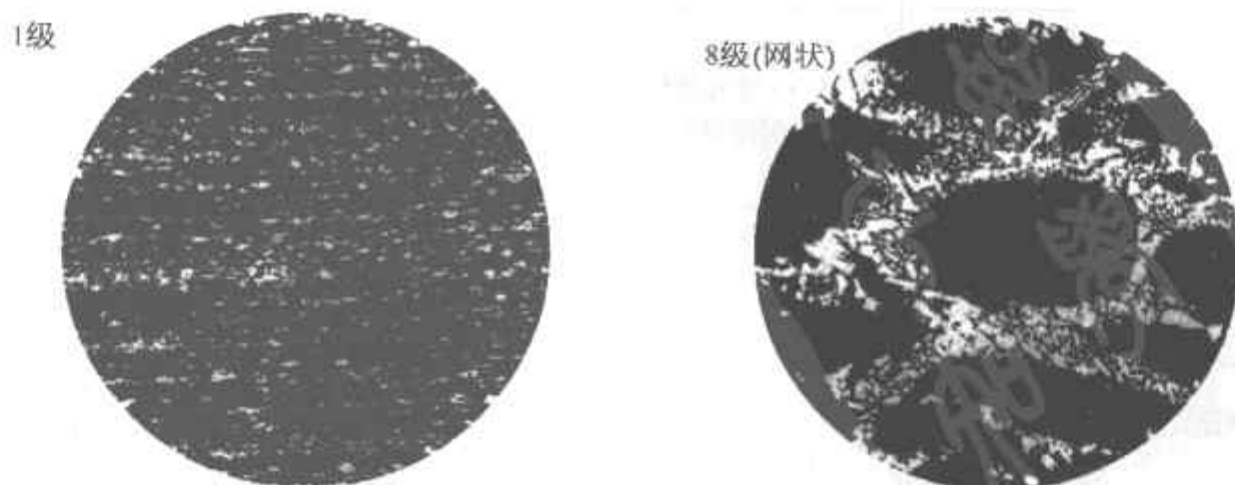


图 8-63 GB/T14979 部分碳化物级别图 100×(×0.75)

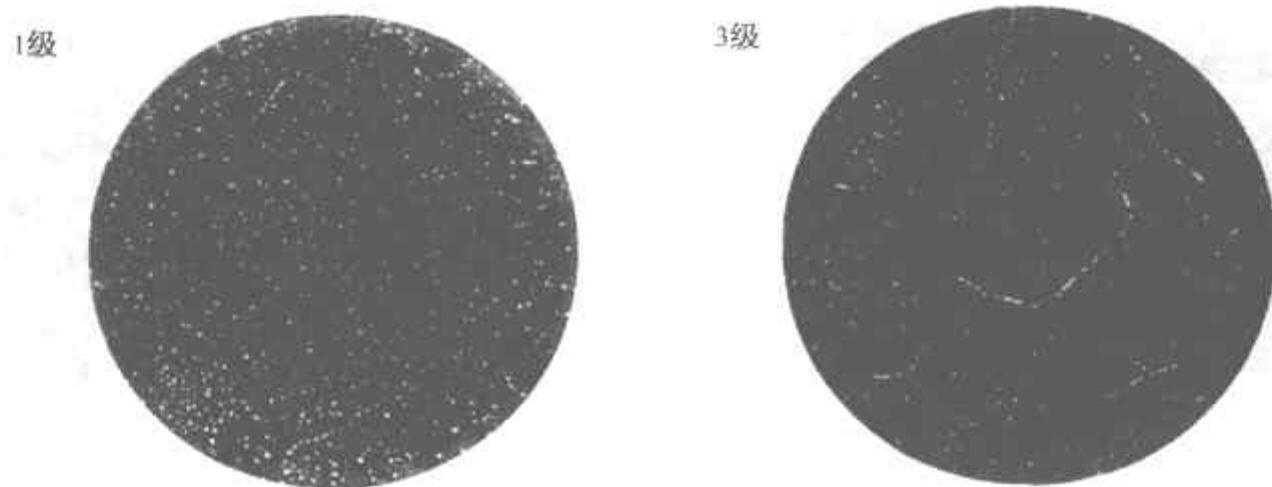


图 8-64 GB/T18254 部分碳化物网状级别图 100×(×0.7)

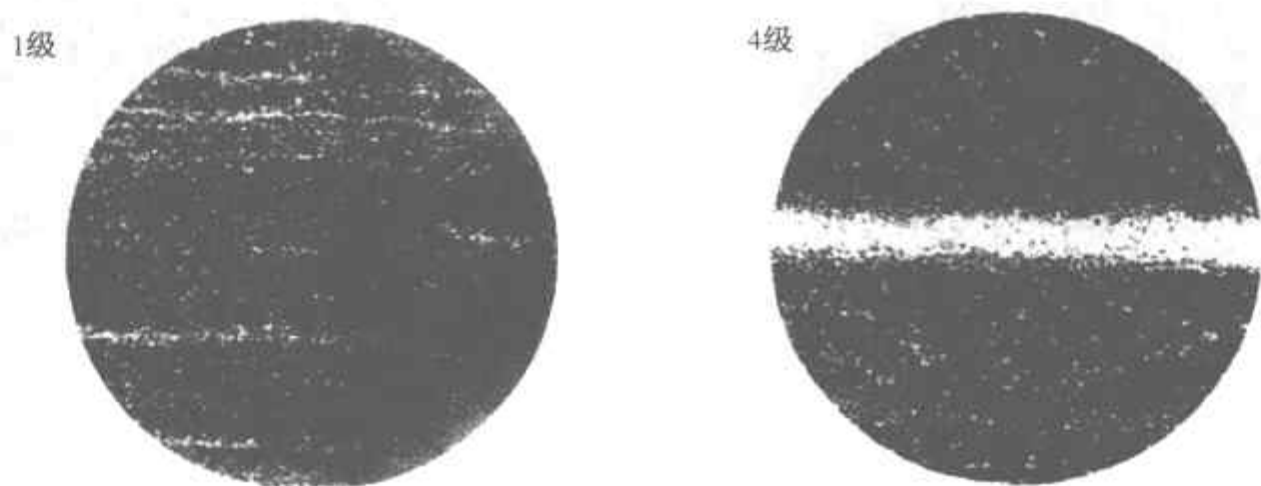


图 8-65 GB/T18254 部分碳化物带状级别图 100×(×0.7)

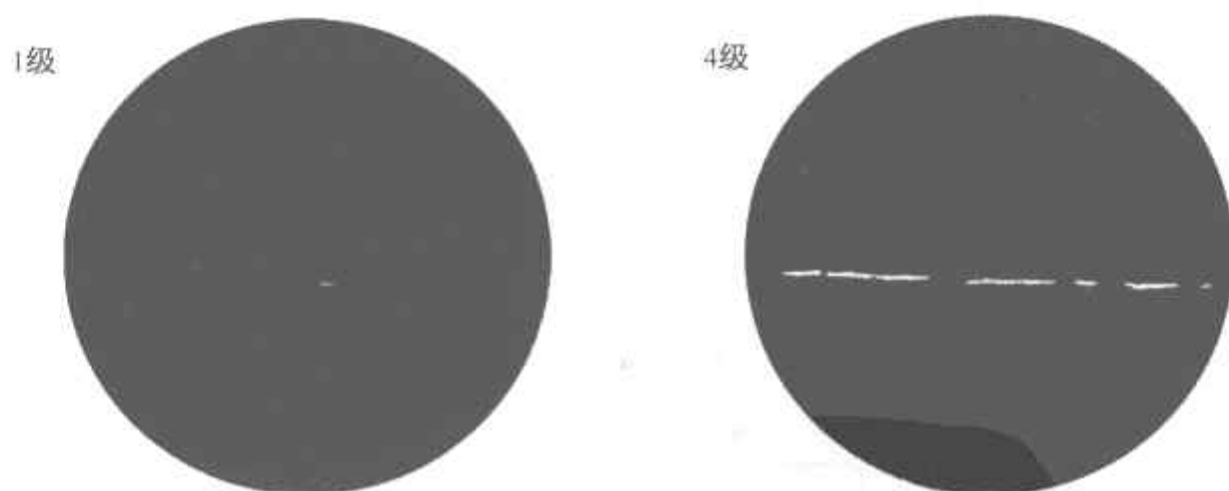


图 8-66 GB/T18254 部分碳化物液析级别图 100×(×0.6)



图 8-67 JB/T6141.3 部分碳化物级别图 400×(×0.7)



图 8-68 QC/T262 部分碳化物级别图 400×(×0.6)



图 8-69 QC/T29018 部分碳化物级别图 400×(×0.6)

评定时,在金相试样、一定倍率下(500 倍或 400 倍)、一定部位处(包括取样方向),按碳化物聚集程度、大小和形状评定;碳化物网状级别按碳化物聚集程度及聚网程度评定;对化学热处理件渗层还要根据碳化物数量,对应相应标准中的图片进行评定。

## 十、化学热处理件铁素体评定

经渗碳、碳氮共渗等化学热处理后,有时零件心部会出现铁素体(由于零件直径较大、淬火加热温度偏低或淬火冷却速度稍低),对于齿轮等重要零件,不但要求表面耐磨而且心部也要有高的强韧性,故而对铁素体的含量要进行控制。对渗氮处理零件,应在渗氮处理前检验其铁素体含量。生产中一般用金相法按相关标准对照评定。

各钢种、工艺条件下基体中铁素体评定常用标准及方法见表 8-46 所示。

表 8-46 铁素体含量评定标准依据一览表

钢种、工艺	采用标准	铁素体评定方法
20CrMnTi、20CrMnMo、20CrNi2Mo、20CrNi3Mo、15CrNi3Mo、20Cr2Ni4 等钢制重载渗碳齿轮渗碳、淬火后	JB/T6141.3《重载齿轮 渗碳金相检验》	心部铁素体级别按含量多少,对照图片评定,分 6 级,最少 1 级,最多 6 级(图 8-70)
08F、Q215AF、Q235AF、10、15、20、20Cr、20CrMnMo 等低碳和低合金钢的零件经碳氮共渗或渗碳层深度小于或等于 0.3 mm 时	JB/T7710《薄层碳氮共渗或薄层渗碳钢件显微组织检测》	心部铁素体级别按含量多少,对照图片评定,分 5 级,最少 1 级,最多 5 级(图 8-71)
钢铁零件渗氮前工件	GB/T11354《钢铁零件 渗氮层深度测定和金相组织检验》	在表层中铁素体级别按含量多少,对照图片评定,分 5 级,最少 1 级,最多 5 级(图 8-72)

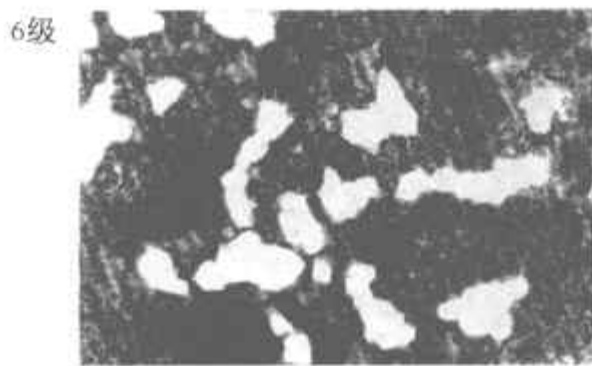
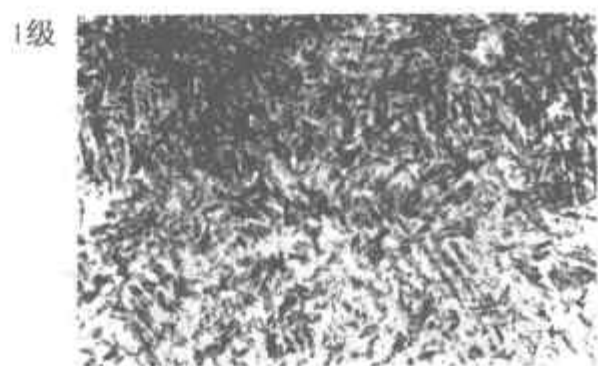


图 8-70 JB/T6141.3 部分心部铁素体级别图 400×(×0.7)

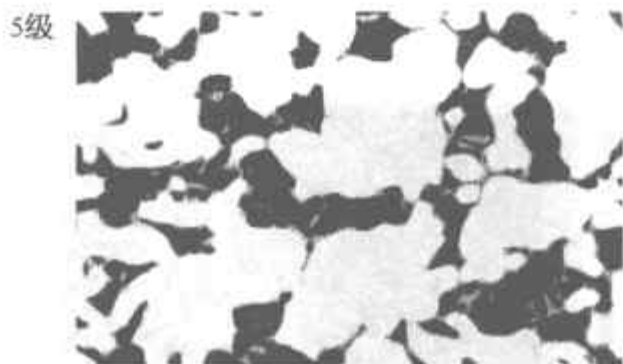
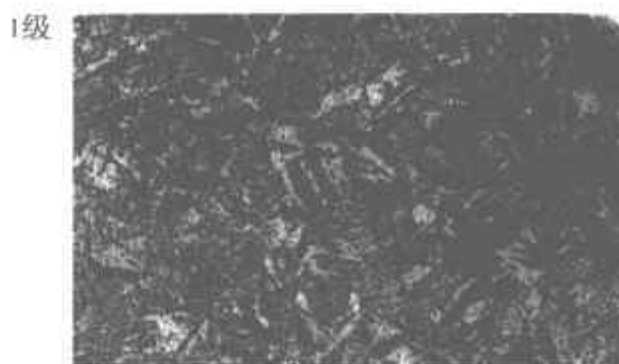


图 8-71 JB/T7710 部分心部铁素体级别图 400×(×0.6)

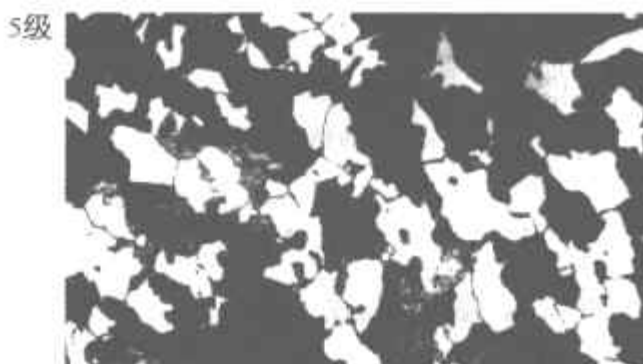
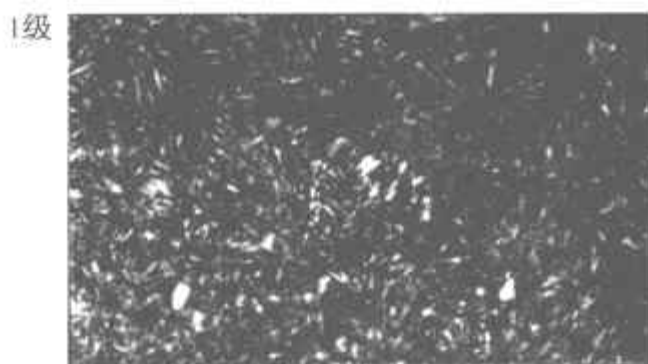


图 8-72 GB/T11354 部分铁素体级别图 500×(×0.5)

评定时,在化学热处理试样心部、一定倍率下,按铁素体的大小和数量,对应相应标准中的图片进行评定。

### 十一、化学热处理渗层深度金相测定

工件经渗碳、碳氮共渗、渗氮等化学热处理后,一般以硬度梯度法测出零件的硬化层深度,并作为仲裁方法,一般检验时,可用金相法。

各钢种、工艺条件下渗层深度金相法常用标准及方法见表 8-47。

表 8-47 渗层深度金相法评定标准依据一览表

钢种、工艺	采用标准	渗层深度测定方法
碳素结构钢渗碳或碳氮共渗后缓冷(平衡状态)	JB/T5944《工程机械热处理件通用技术条件》	从表面垂直测至过渡区的 1/2 处
合金钢渗碳或碳氮共渗后缓冷(平衡状态)	JB/T5944《工程机械热处理件通用技术条件》	从表面垂直测至原始组织
08F、Q215AF、Q235AF、10、15、20、20Cr、20CrMnMo 等低碳和低合金钢的零件经碳氮共渗或渗碳层深度小于或等于 0.3 mm 时(平衡状态)	JB/T7710《薄层碳氮共渗或薄层渗碳钢件显微组织检测》	从表面垂直测至心部组织(图 8-73)
钢铁零件渗氮处理	GB/T11354《钢铁零件 渗氮层深度测定和金相组织检验》	从表面垂直测至与基体组织有明显的分界处(图 8-74)





图 8-73 JB/T7710 薄层碳氮共渗或薄层渗碳渗层深度测量图 400×(×0.6)

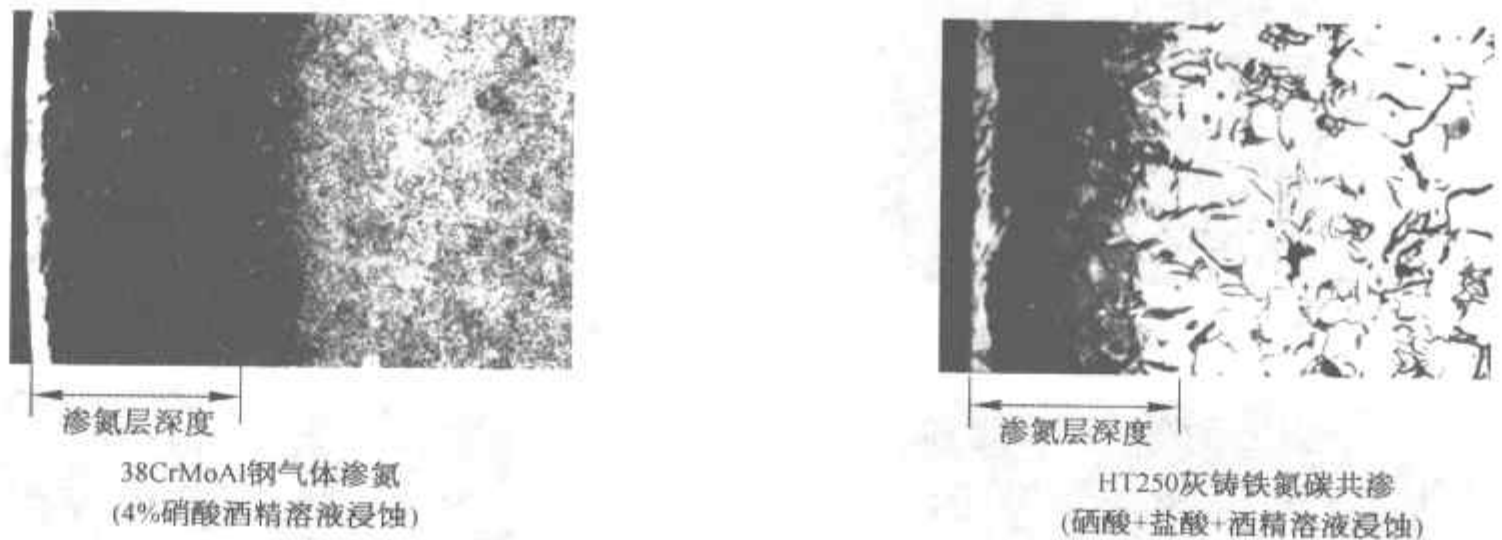


图 8-74 GB/T11354 渗氮层深度测量图 100×(×0.5)

## 十二、渗金属层检验

钢的渗金属是把一种或几种金属元素在高温下扩散到基体金属表面,使表面合金化,形成一层具有特殊性能的表面层,以满足使用要求。

钢铁零件渗金属层的检验可依据 JB/T5069《钢铁零件渗金属层金相检验方法》进行,适用于钢铁零件经渗铬、渗铝、渗锌、渗钒、渗钛、渗铌处理后渗层与基体有明显分界线的渗层深度。按渗入元素、基体钢种、渗剂及组成、工艺等选择不同的浸蚀剂,使试样经制样、浸蚀后,渗层与基体有明显分界线,再按渗层深度范围选择相应放大倍数,在金相显微镜下测量其渗层深度。

## 十三、过热、过烧组织评定(工具钢、铝合金)

### 1. 工具钢过热、过烧组织评定

当淬火加热温度过高或保温时间过长时,马氏体针叶粗大,针叶长度变长,表明钢在淬火加热时已经过热;晶粒粗大,晶界熔化,组织中有网状碳化物及黑色组织,表明钢在淬火加热时已经过烧;工具钢过热、过烧组织使钢的力学性能降低、脆性增大,导致刀具在使用过程中容易变形、崩刀、开裂等。各钢种过热、过烧组织特征归纳见表 8-48(参照 ZB J36003《工具热处理金相检验标准》)。

表 8-48 工具钢过热、过烧组织特征一览表

	过热组织特征	过烧组织特征
碳素工具钢	马氏体针叶粗大,针叶长度变长,一般情况下马氏体不大于 2~3 级合格	出现熔融状疏松
合金工具钢	马氏体针叶粗大,针叶长度变长,一般情况下马氏体不大于 2~3 级合格	晶粒粗大,晶界熔化,冷却后得到网状碳化物及黑色组织组成的过烧组织
高速工具钢	晶粒内部出现黑色组织,碳化物呈半网状、网状分布	显微组织上出现大块次生莱氏体及黑色组织

## 2. 铝合金过烧组织评定

当金属温度达到或高于合金中低熔点共晶的熔点或固相线,使共晶或固溶体晶界产生复熔的现象叫过烧。在显微组织中,出现下列特征之一即为过烧:

- (1) 复熔共晶球;
- (2) 晶界局部复熔加宽;
- (3) 在三个晶粒交界处形成复熔三角形。

铝合金过烧组织的评定可依据标准 GB/T3246.1《变形铝及铝合金制品显微组织检验方法》,根据样品牌号,选择相应的浸蚀剂,对照标准中的图片进行评定。

## 十四、有效硬化层及硬化层深度的测定

工件经化学热处理或表面淬火热处理后,表面有效硬化层或硬化层深度的测定,均在渗层或淬硬层的法向截面上通过硬度梯度的测定面求得。

### 1. 由表及里的硬度梯度的测定

在规定的,或特别协议的试样上法向取样,按金相分析要求制样,应注意避免倒角或过热,一般不浸蚀。在规定的部位,宽度  $W$  约为 1.5 mm 范围内,在与工件表面垂直的一条或多条平行线上测定维氏硬度,见图 8-75 所示。每两相邻压痕之间距离  $S$  应不小于压痕对角线的 2.5 倍。逐次相邻压痕中心至工件表面的距离差值(即  $d'_2 - d'_1$  或  $d''_{n-1} - d''_n$ )不应超过规定值(测量精度应在  $\pm 0.25 \mu\text{m}$  之内)。常使用的试验力在 HV0.1 至 HV1 间适当选用,也可采用努氏硬度测定。

根据测定结果可绘制出硬度梯度曲线,见图 8-76。

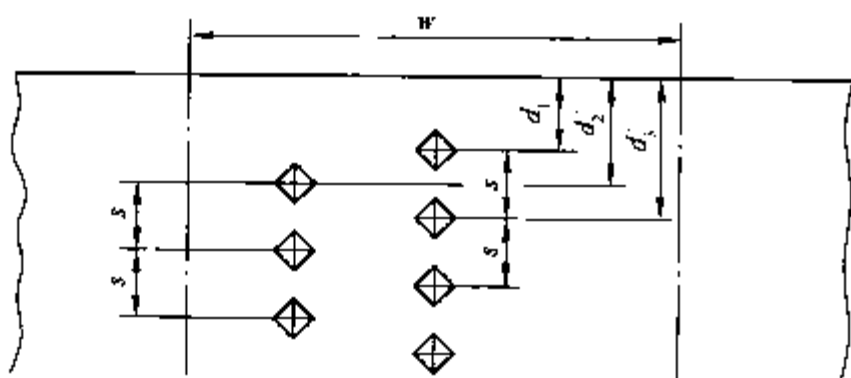


图 8-75 硬度压痕位置

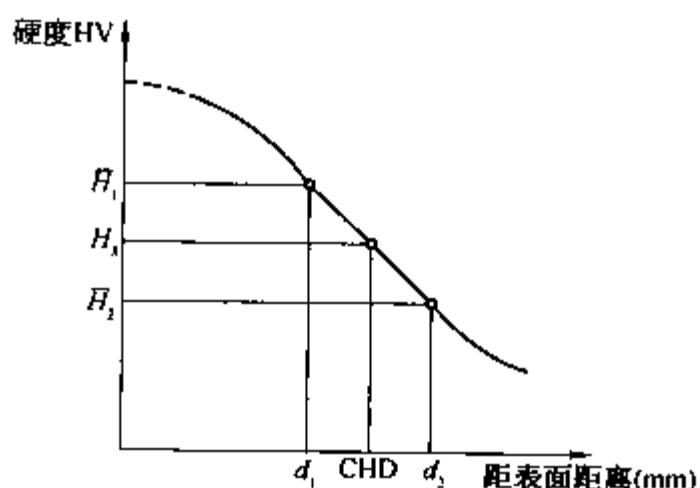


图 8-76 硬度梯度曲线

### 2. 钢件渗碳及碳氮共渗淬火硬化层深度测定

(1) 执行标准: GB/T9450(ISO2639)《钢件渗碳淬火硬化层深度的测定和校核》,是唯一仲裁方法。

(2) 淬硬层深度定义: 从工件表面到维氏硬度值为 550 HV1 处的垂直距离。

(3) 适用条件: 工件经渗碳或碳氮共渗淬火后,距表面 3 倍于淬火硬化层深度处硬度值小于 450 HV。当其值高于 450 HV 的钢件,应选择大于 550 HV(以 25 HV 为一级)的某一特定值作为界限硬度。

(4) 表示方法: 淬硬层深度用字母“CHD”表示,单位为 mm。例: CHD=0.8 mm,表示测定维氏硬度,采用 9.807 N(1 kgf)的试验力。

若在非标准条件下测定,应在 CHD 后标注,如 CHD515 HV5=0.95 mm,表示采用维氏硬度试验力为 49.03 N(5 kgf),界限硬度值为 515 HV 条件下,硬化层深度为 0.95 mm。

(5) 测定方法: 采用 HV1(9.807 N)载荷测定由表及里硬度梯度曲线,其中  $d'_2 - d'_1$  应不超过 0.1 mm,一般应在各方约定的位置上测得两条或更多条硬度曲线。根据每条曲线确定硬度值为 550 HV 或相应努氏硬度值处至工件表面的距离,见图 8-75。当各数值差小于或等于 0.1 mm 时,则取平均值为硬化层深度。若差值大于 0.1 mm,则应重复试验。

当淬硬层深度已大致确定的条件下,可采用内插法校核。在距表面距离小于估计确定硬化层深度的距离

$d_1$  及大于估计确定硬化层深度  $d_2$  的位置上至少各测 5 个硬度值(取平均值,分别为  $\bar{H}_1, \bar{H}_2$ ),可按内插公式求得硬化层深度:

$$\text{CHD} = d_1 + \frac{(d_2 - d_1)(\bar{H} - \text{HS})}{\bar{H}_1 - \bar{H}_2}$$

其中,  $(d_2 - d_1)$  不应超过 0.3 mm; HS 为规定硬度值(一般为 550 HV1);参见图 8-76 的曲线示意。

### 3. 钢件薄表面硬化层或有效硬化层深度测定

(1) 执行标准: GB/T9451(ISO4970)《钢件薄表层总硬化层深度或有效硬化层深度的测定》。

(2) 定义: 从工件表面垂直方向测量到规定的显微硬度值的硬化层距离称为有效硬化层深度。当测到显微硬度值无明显变化的硬化层的距离总成为总硬化层深度。

(3) 适用条件: 表面总硬化层深度或有效硬化层深度小于 0.3 mm 的钢制件。

(4) 表示方法: 同本节 2. (4) 条。

(5) 测定方法: 采用的试验力一般为 1.97~2.94 N(0.2~0.3 kgf), 具体操作要求同本节 2. (5) 条。

### 4. 钢的感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度测定

(1) 执行标准: GB/T5617(ISO3754)《钢的感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度的测定》,是唯一仲裁方法。

(2) 定义: 从工件表面垂直方向测量到极限硬度值( $\text{HV}_{\text{HL}}$ )的硬化层距离称为该工艺下的有效硬化层深度,极限硬度值由下式求得:

$$\text{HV}_{\text{HL}} = 0.8 \times \text{HV}_{\text{MS}}$$

其中,  $\text{HV}_{\text{MS}}$  为工件表面所要求的最低硬度,一般可由 HRC 转换成 HV。

(3) 适用条件: 经感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度大于 0.3 mm 的钢件,且距表面 3 倍于有效硬化层深度(DS)处的硬度应低于极限硬度( $\text{HV}_{\text{HL}} - 100$ )。不符合条件时,可协商规定极限硬度值。

(4) 表示方法: 感应淬火或火焰淬火后有效硬化层深度用“DS”表示,单位为 mm。当试验力为 9.8 N(1 kgf),有效硬化层为 0.6 mm 时,可表示为 DS=0.6 mm。

当在非标准条件下测得,应在 DS 后注明,如 DS 4.9/0.9=0.6 mm,表示采用 4.9 N(0.5 kgf) 试验力,  $\text{HV}_{\text{HL}} = 0.9 \times \text{HV}_{\text{MS}}$  条件下测得有效硬化层深度为 0.6 mm。

(5) 测定方法: 一般采用 9.8 N(1 kgf) 负荷下用维氏硬度测硬度梯度,  $d_2' - d_1' \geq 0.1$  mm,也可采用 4.9~49 N(0.5~5 kgf) 的负荷,具体操作同本节 2. (5) 条。

### 5. 钢的渗氮层深度测定

(1) 执行标准: GB/T11354《钢铁零件渗氮层深度测定和金相组织检验》,仲裁测定方法。

(2) 定义: 从工件表面垂直方向测量到比基体维氏硬度值高 50 HV(对于渗氮层硬度变化很平缓的钢件如碳钢或低碳低合金钢制件,高 30 HV)处的距离为渗氮层深度。基体硬度值为距离表面 3 倍渗氮层深度处测得的硬度值(至少取 3 点平均)。

(3) 适用条件: 气体渗氮、离子渗氮、氮碳共渗处理后的工件。

(4) 表示方法: 渗氮层深度用“ $D_N$ ”表示,单位为 mm。例如 0.25 $D_N$ (300 HV0.5),表示界限硬度为 300 HV 0.5、试验力为 4.9 N(0.5 kgf)时,渗氮层深度为 0.25 mm。

(5) 测定方法: 一般采用 2.94 N(0.3 kgf) 负荷下用维氏硬度测硬度梯度,  $d_2' - d_1' \geq 0.1$  mm,也可采用 1.96~19.6 N(0.2~2 kgf) 的负荷,具体操作同本节 2. (5) 条。

## 第五节 金属材料化学分析方法

金属材料化学成分的分析方法有多种,一般可分为两大类:常规湿法分析及仪器分析方法,若作为仲裁分析常要求采用前者。同时,为保证分析数据的真实、可靠,对分析试样的采集及制备都有明确的规定。

## 一、取样方法与规定

对金属材料的化学成分进行分析,首先要保证所取试样均匀具有代表性,否则得到的数据是毫无意义的,甚至将误导其对材料质量的认定和判断。因此必须在材料具有代表性的部位或统一规定的部位采样,试样应均匀一致,能充分代表同一批量材料的化学成分,并应有足够的数量,以满足全部分析的要求。

### 1. 试样的取样部位及方法

可按 GB/T20066《钢和铁 化学成分测定用试样的取样和制样方法》及 GB/T17432《变形铝及铝合金 化学成分分析取样方法》等国家标准执行。分析试样在化学成分方面应具有良好的均匀性;应除去表面氧化皮或涂层、除湿、除尘及油污等其他形式的外来污染;应尽可能避开空隙、裂纹、疏松、毛刺、折叠或其他表面缺陷;对经过热处理或表面处理的成品材料,还应除去渗碳层(渗氮层)、脱碳层、镀层金属、表面氧化层等;对具有较高硬度的成品材料,可以在其心部取样,或采用适当的工序退火软化,但以不破坏其原有化学成分为原则,原始样品及分析试样的量应足够大,以满足全部分析的要求及必要时的复验。

### 2. 常规湿法化学分析或需溶解试样的仪器分析的取样——屑状试样

可采用钻床、车床、刨床等工具制取。制样过程所使用的工具、机械、容器应预先进行清理和清洗,以防止对分析试样产生污染及混入杂物;制取样屑时,要控制转速、进刀深度和速度,避免试样烧蓝或发黑氧化;不能使用水、机油或其他润滑剂,避免污染试样而难以清除,只有当屑状试样能用适当的不残留溶剂完全清洗除掉时,才能在机械加工过程中使用冷却剂;制成的试样不能混有杂物、锈蚀,保持清洁干燥,用光洁的试样袋盛装。

### 3. 化学分析试样的取样量

取样量随分析方法的不同而各异,一般来说,按分析一个元素计,光度法约 2 g;滴定法约 5 g;重量法约 5~20 g;加上备样,应有 5 倍的增量。

### 4. 用于特定仪器分析的取样——块状试样

制取试样的尺寸大小及形状要适合分析方法(主要是光电发射光谱分析方法、X 射线荧光光谱分析方法、气体元素分析方法以及各种物理分析方法等)的需要。可采用合适的机加工制取,并适当予以磨平和抛光。用于制备样品的设备应设计成尽可能减少样品的过热,必要时配备相应的冷却系统;分析试样的表面制备应该制备到露出适合于分析方法使用的表面,已受切割火焰热影响的样品的任何部分不能用于制备分析表面;制备后,分析试样的表面应该没有颗粒异物,平整且要控制好粗糙度,并没有对分析结果准确度产生影响的缺陷;制备完成的分析试样应作去污清洁处理,保持干燥、清洁,妥善存放,防止试样表面被再污染。

## 二、常用化学分析方法

湿法分析是以物质定量的化学反应及其剂量关系为基础,通过测量物质间某些特定的化学反应所定量显示的特性量,借以确定其物质组分含量的分析方法。湿法分析方法又以其化学反应的类型及操作方法的不同,主要可分为四种:分光光度分析法、滴定分析法、重量分析法、电化学分析法。这些方法都是要通过加入化学试剂将试样经溶解或熔融处理,使之分解在溶液中,再通过加入合适的化学试剂进行化学反应操作步骤,得以检测其试样中被测组分的化学元素成分。仪器分析是通过测量物质的某些物理或物理化学性质以确定其化学组成及含量的分析方法。常用于金属材料成分检测的仪器分析方法有原子吸收光谱分析、原子发射光谱分析及气体元素分析三类。常用化学分析方法及特点见表 8-49。对于具体的分析方法及具体分析元素均有相关的国家标准。

表 8-49 金属材料常用化学分析方法特点一览表

化学分析方法分类		方 法 特 点
常规湿法分析	分光光度法	<p>将某一元素与特定试剂(称为显色剂)结合,在一定的介质和酸度中,形成一种具有稳定颜色的物质(称为络合物),利用它对特定波长的单色光具有一定的吸收度的这种特性,借以达到检测元素特性量的目的,由此可算出实际含量。</p> <p>灵敏度: <math>10^{-4}\%</math> ~ <math>10^{-5}\%</math>; 相对误差: 为 <math>2\%</math> ~ <math>5\%</math>; 测量范围: <math>1\%</math> ~ <math>10^{-3}\%</math></p>



(续表)

化学分析方法分类		方 法 特 点
常 规 分 析 法	滴 定 分 析 法	原理 是将一种已知准确浓度的试剂(标准滴定溶液),滴加到含有被测物质的溶液中,直到所加的试剂与被测物质完全反应。由于该反应是按一定的化学平衡定量进行的,具有与化学反应方程式相符的计量关系,因此根据标准滴定溶液的浓度和用量,可以计算出被测物质的组分含量。 相对误差:1%~10%时,为0.1%~0.3%;测量范围:≥1%
		酸碱滴定法 即用酸标准滴定溶液或碱标准滴定溶液来滴定碱性物质或酸性物质,根据酸碱反应达到平衡时所反映的物质特性量,来确定被测物质的组分含量的分析方法
		氧化还原滴定法 一种氧化态的物质离子被还原,而另一种还原态的物质离子被氧化,当此反应达到平衡时,根据所显示的物质特性量确定被测物质的组分含量
		络合滴定法 一种被测物质的离子与另一种大分子的有机化合物(称为络合剂)结合,定量生成新的化合物(称为络合物),当此反应达到平衡时,根据所显示的物质特性量确定被测物质的组分含量
		沉淀滴定法 利用标准滴定溶液与被测物质的离子定量反应生成沉淀,根据标准滴定溶液的浓度及用量,计算出被测物质的组分含量
分 析 法	重 量 分 析 法	原理 是将被测物质组分以某种形式从试样中分离出来,通过称量该分离物的质量,计算出被测物质组分含量的分析方法。该方法准确度高,常用于中等含量以上的组分测定,或仲裁分析
		沉淀法 在试样溶液中加入适当的试剂,使被测组分生成难溶化合物从溶液中沉淀析出,经陈化、过滤、洗涤、烘干或灼烧,使之转化为一定的称量形式,称量其沉淀质量,用以计算出被测组分的成分含量
		挥发法 试样通过加热或者加入某种试剂,使某种挥发性成分或被测组分生成挥发性物质从试样中逸出,然后根据试样质量的减少量计算被测组分的成分含量;或者应用某种吸收剂将逸出的挥发性物质吸收富集,根据吸收剂质量的增加量来计算出被测组分的成分含量
		电解法 利用电解原理使被测组分金属离子在电极上析出,然后根据称量电极上析出物质的质量,计算出被测组分的成分含量的分析方法
仪 器 分 析 法	原子吸收光谱分析方法 是一种借助仪器测量气态自由原子对特征光辐射的吸收的方法,其适用范围广,试样以溶液状态进样,大多数金属元素一般都能直接测定;选择性好,元素间的干扰较小,一般不需要分离共存元素;分析速度快,效率很高。 灵敏度:火焰法 $10^{-5}\%$ ,非火焰法 $10^{-6}\%$ ;精密度:相对偏差 $\leq 2\%$	
	原子发射光谱分析方法	
	光电直读原子发射分析仪 以电火花或电弧作激发源,使试样直接激发,产生原子态蒸气,再进行光谱分析。该仪器使用块状或棒状试样;自动化程度高,可以在2min内同时完成多达几十种元素的检测数据报告;选择性好,检出能力强,重现性好。 灵敏度: $10^{-5}\%$ ;检测范围: $10^6$ 数量级	
	等离子体原子发射光谱仪 试样以溶液状态进入等离子炬激发源,使其原子化而被激发,产生辐射光谱,再进行光谱分析。该仪器自动化程度高,操作简单,分析速度快;适应酸性、碱性、水相或有机相、高盐试样溶液; 灵敏度: $10^{-6}\%$ ~ $10^{-8}\%$ ;精密度:1%~2%;常量组分元素:0.5%;检测范围: $10^6$ ~ $10^8$ 数量级	
	原理 是金属材料中气体元素的分析以及以气体分子形式检测的分析,包括氢、氧、氮、碳和硫五个元素。分析主要步骤:试样熔融—提取分离—检测—数据报告。	
气 体 元 素 分 析 法	高频熔融红外检测碳硫分析仪 在氧气流气氛中,试样经高频加热熔化,试样中的碳和硫被氧化,以 $\text{CO}_2$ 和 $\text{SO}_2$ 气体形式逸出,被氧气流带入红外吸收池检测。该仪器采用屑状试样,粉状、颗粒、小块试样也可适用;完成速度快,一次分析仅需不到1min时间;效率高,适合于快速分析和大批量分析工作。 检测范围:碳0.0001%~10%,硫0.0001%~3.0%;平均偏差:碳0.5%,硫2%	
	惰性气氛脉冲熔融氢氧氮分析仪 目前较先进的具有代表性的仪器是采用惰性气氛脉冲熔样,色谱分离,催化富集,以红外吸收池或热导检测池分别检测氢、氧、氮,运用相关的计算模式分别得到其成分结果。该仪器通常采用细棒状或粉末状试样;速度快,一次分析仅需不到3min时间;效率高,适合于快速分析和大批量分析工作。 检测范围:氢 $1 \times 10^{-5}\%$ ~0.25%,氧 $5 \times 10^{-6}\%$ ~5%,氮 $5 \times 10^{-6}\%$ ~3%;平均偏差:氢1.5%,氧0.5%,氮0.5%	

### 三、微区成分分析方法

微区化学成分分析是指用各种微探针仪对材料表面、截面表面或断面、裂面上的微区域进行化学成分分析。“微区”可以是夹杂物、成分偏析区、渗层或覆盖物区等，“微区”的大小可根据测试仪器及分析要求而变化。

微区成分分析内容包括测定表面的元素组成、元素的化学态及分布(线扫描;面扫描)。用于微区成分分析的方法主要有:电子探针 X 射线显微分析(EPMA)、X 射线光电子谱(XPS)、俄歇电子能谱(AES)、二次离子质谱(SIMS)等。主要分析方法的比较见表 8-50 所示。用于微区成分分析的试样,要根据所选用的仪器的要求而制备。

表 8-50 微区成分分析方法比较

方 法		可测定范围(元素)	探测极限(%)	探测深度(nm)	信息类型
电子探针 (EPMA)	波谱(WDS)	$\geq \text{Be}$	0.1	1~10 $\mu\text{m}$	元素
	能谱(EDS)	$\geq \text{B}$			元素、某些氧化态
X 射线光电子谱(XPS)		$> \text{He}$	1	0.5~2.5 (有机物: 4~10)	元素、化学态
俄歇电子能谱(AES)		$\geq \text{Li}$	0.1	0.4~2	元素、某些化学态
二次离子质谱(SIMS)		$\geq \text{H}$	$10^{-5} \sim 10^{-9}$	0.3~2	元素、同位素、有机物化合物

### 四、化学分析的允许偏差

任何化学分析的结果与其真值都会有偏差(即不确定度),为客观地判定材料的化学成分的符合性,国家制定了相关标准,如中国金属学会测试分会推荐标准 CSM 01 01 01 00《化学成分分析测量不确定度评定导则》等。国家标准 GB/T222《钢的成品化学成分允许偏差》规定了非合金钢(沸腾钢除外)、低合金钢、合金钢的成品钢材(包括钢坯)的化学成分相对于熔炼化学成分界限值的允许偏差。表 8-51、表 8-52、表 8-53 所列为钢的主要元素成分化学成分允许偏差参考表,分别对应于 GB/T222《钢的成品化学成分允许偏差》中的表 1、表 2、表 3 所列的规定。

表 8-51 非合金钢和低合金钢成品化学成分允许偏差 (质量分数,%)

元 素	规定化学成分上限值	允 许 偏 差	
		上 偏 差	下 偏 差
C	$\leq 0.25$	0.02	0.02
	$> 0.25 \sim 0.55$	0.03	0.03
	$> 0.55$	0.04	0.04
Mn	$\leq 0.80$	0.03	0.03
	$> 0.80 \sim 1.70$	0.06	0.06
Si	$\leq 0.37$	0.03	0.03
	$> 0.37$	0.05	0.05
S	$\leq 0.050$	0.005	—
	$> 0.05 \sim 0.35$	0.02	0.01
P	$\leq 0.060$	0.005	—
	$> 0.06 \sim 0.15$	0.01	0.01
V	$\leq 0.20$	0.02	0.01
Ti	$\leq 0.20$	0.02	0.01

(续表)

元 素	规定化学成分上限值	允 许 偏 差	
		上 偏 差	下 偏 差
Nb	0.015~0.060	0.005	0.005
Cu	≤0.55	0.05	0.05
Cr	≤1.50	0.05	0.05
Ni	≤1.00	0.05	0.05
Pb	0.15~0.35	0.03	0.03
Al	≥0.015	0.003	0.003
N	0.010~0.020	0.005	0.005
Ca	0.002~0.006	0.002	0.0005

表 8-52 合金钢成品化学成分允许偏差

(质量分数,%)

元 素	规定化学成分上限值	允 许 偏 差	
		上 偏 差	下 偏 差
C	≤0.30	0.01	0.01
	>0.30~0.75	0.02	0.02
	>0.75	0.03	0.03
Mn	≤1.00	0.03	0.03
	>1.00~2.00	0.04	0.04
	>2.00~3.00	0.05	0.05
	>3.00	0.10	0.10
Si	≤0.37	0.02	0.02
	>0.37~1.50	0.04	0.04
	>1.50	0.05	0.05
Ni	≤1.00	0.03	0.03
	>1.00~2.00	0.05	0.05
	>2.00~5.00	0.07	0.07
	>5.00	0.10	0.10
Cr	≤0.90	0.03	0.03
	>0.90~2.10	0.05	0.05
	>2.10~5.00	0.10	0.10
	>5.00	0.15	0.15
Mo	≤0.30	0.01	0.01
	>0.30~0.60	0.02	0.02
	>0.60~1.40	0.03	0.03
	>1.40~6.00	0.05	0.05
	>6.00	0.10	0.10

(续表)

元 素	规定化学成分上限值	允 许 偏 差	
		上 偏 差	下 偏 差
V	$\leq 0.10$	0.01	—
	$> 0.10 \sim 0.90$	0.03	0.03
	$> 0.90$	0.05	0.05
W	$\leq 1.00$	0.04	0.04
	$> 1.00 \sim 4.00$	0.08	0.08
	$> 4.00 \sim 10.00$	0.10	0.10
	$> 10.00$	0.20	0.20
Al	$\leq 0.10$	0.01	—
	$> 0.10 \sim 0.70$	0.03	0.03
	$> 0.70 \sim 1.50$	0.05	0.05
	$> 1.50$	0.10	0.10
Cu	$\leq 1.00$	0.03	0.03
	$> 1.00$	0.05	0.05
Ti	$\leq 0.20$	0.02	—
B	0.0005~0.005	0.0005	0.0001
Co	$\leq 4.00$	0.10	0.10
	$> 4.00$	0.15	0.15
Pb	0.15~0.35	0.03	0.03
Nb	0.20~0.35	0.02	0.01
S	$\leq 0.050$	0.005	—
P	$\leq 0.050$	0.005	—

表 8-53 不锈钢和耐热钢成品化学成分允许偏差

(质量分数,%)

元 素	规定化学成分上限值	允 许 偏 差	
		上 偏 差	下 偏 差
C	$\leq 0.010$	0.002	0.002
	$> 0.010 \sim 0.030$	0.005	0.005
	$> 0.030 \sim 0.20$	0.01	0.01
	$> 0.20 \sim 0.60$	0.02	0.02
	$> 0.60 \sim 1.20$	0.03	0.03
Mn	$\leq 1.00$	0.03	0.03
	$> 1.00 \sim 3.00$	0.04	0.04
	$> 3.00 \sim 6.00$	0.05	0.05
	$> 6.00 \sim 10.00$	0.06	0.06
	$> 10.00 \sim 15.00$	0.10	0.10
	$> 15.00 \sim 20.00$	0.15	0.15

(续表)

元 素	规定化学成分上限值	允 许 偏 差	
		上 偏 差	下 偏 差
P	$\leq 0.040$	0.005	—
	$> 0.040 \sim 0.20$	0.01	0.01
S	$\leq 0.040$	0.005	—
	$> 0.040 \sim 0.20$	0.010	0.01
	$> 0.20 \sim 0.50$	0.02	0.02
Si	$\leq 1.00$	0.05	0.05
	$> 1.00$	0.10	0.10
Cr	$> 3.00 \sim 10.00$	0.10	0.10
	$> 10.00 \sim 15.00$	0.15	0.15
	$> 15.00 \sim 20.00$	0.20	0.20
	$> 20.00 \sim 30.00$	0.25	0.25
Ni	$\leq 1.00$	0.03	0.03
	$> 1.00 \sim 5.00$	0.07	0.07
	$> 5.00 \sim 10.00$	0.10	0.10
	$> 10.00 \sim 20.00$	0.15	0.15
	$> 20.00 \sim 30.00$	0.20	0.20
	$> 30.00 \sim 40.00$	0.25	0.25
	$> 40.00$	0.30	0.30
Mo	$> 0.20 \sim 0.60$	0.03	0.03
	$> 0.60 \sim 2.00$	0.05	0.05
	$> 2.00 \sim 7.00$	0.10	0.10
	$> 7.00 \sim 15.00$	0.15	0.15
	$> 15.00$	0.20	0.20
Ti	$\leq 1.00$	0.05	0.05
	$> 1.00 \sim 3.00$	0.07	0.07
	$> 3.00$	0.10	0.10
Co	$> 0.05 \sim 0.50$	0.01	0.01
	$> 0.50 \sim 2.00$	0.02	0.02
	$> 2.00 \sim 5.00$	0.05	0.05
	$> 5.00 \sim 10.00$	0.10	0.10
	$> 10.00 \sim 15.00$	0.15	0.15
	$> 15.00 \sim 22.00$	0.20	0.20
	$> 22.00 \sim 30.00$	0.25	0.25
Nb+Ta	$\leq 1.50$	0.05	0.05
	$> 1.50 \sim 5.00$	0.10	0.10
	$> 5.00$	0.15	0.15

(续表)

元 素	规定化学成分上限值	允 许 偏 差	
		上 偏 差	下 偏 差
Ta	$\leq 0.10$	0.02	0.02
Cu	$\leq 0.50$	0.03	0.03
	$> 0.50 \sim 1.00$	0.05	0.05
	$> 1.00 \sim 3.00$	0.10	0.10
	$> 3.00 \sim 5.00$	0.15	0.15
	$> 5.00 \sim 10.00$	0.20	0.20
Al	$\leq 0.15$	0.01	0.005
	$> 0.15 \sim 0.50$	0.05	0.05
	$> 0.50 \sim 2.00$	0.10	0.10
	$> 2.00 \sim 5.00$	0.20	0.20
	$> 5.00 \sim 10.00$	0.35	0.35
N	$\leq 0.02$	0.005	0.005
	$> 0.02 \sim 0.19$	0.01	0.01
	$> 0.19 \sim 0.25$	0.02	0.02
	$> 0.25 \sim 0.35$	0.03	0.03
	$> 0.35$	0.04	0.04
W	$\leq 1.00$	0.03	0.03
	$> 1.00 \sim 2.00$	0.05	0.05
	$> 2.00 \sim 5.00$	0.07	0.07
	$> 5.00 \sim 10.00$	0.10	0.10
	$> 10.00 \sim 20.00$	0.15	0.15
V	$\leq 0.50$	0.03	0.03
	$> 0.50 \sim \leq 1.50$	0.05	0.05
	$> 1.50$	0.07	0.07
Se	全部	0.03	0.03

成品化学成分允许偏差是指熔炼分析的成分值在规定的范围内,但由于钢中元素的偏析,成品分析的成分值可能超出标准规定的成分界限值。对超出界限值的大小规定一个允许的数值,就是成品化学成分允许偏差。产品标准中规定的残余元素不适用于表 8-50~表 8-52 中规定的成品化学成分允许偏差。表 8-50~表 8-52 中的偏差值适用于横截面积不大于  $65\,000\text{ mm}^2$  的钢材(或钢坯),大于该横截面积的钢材(或钢坯)的化学成分允许偏差值可适当加大,其具体数值可由供需双方协商确定。

## 第六节 钢的火花鉴别

在热处理生产过程中为了保证产品质量,对原材料化学成分控制是一个相当重要的环节。火花鉴别是钢

铁材料化学成分现场控制手段中最为简易的方法之一,熟练掌握应用火花鉴别能防止钢铁材料的混料,减少和避免由于材料的混淆而产生的热处理产品的质量事故。

### 一、火花鉴别的原理

钢铁材料在一定的压力下与旋转砂轮接触时,砂轮对工件产生切削作用,从工件产生的钢铁微粒被磨削热加热成熔融状态脱离工件,沿砂轮切线方向作高速运动,产生光亮的流线形成火花束,这些高温熔融状态的金属颗粒与空气中的氧气接触会形成氧化膜,钢中的碳元素,在高温下极易与氧结合形成一氧化碳,发生还原反应,这时被还原的铁再度被空气氧化,然后再还原。这种反应多次重复,当一氧化碳气体压力超过熔融金属的表面张力时便爆裂成火花,同时高温钢粒在空间运行形成切向的轨迹,就是我们所见的一条光亮线和光亮火花。根据产生火花束的形状特征及颜色来初步判别工件的化学成分的方法称为火花鉴别法。

钢铁中的碳元素含量主要是根据火花的爆裂程度来判别的,钢铁中的碳含量越高,火花越多、爆裂越烈、火束越多。在合金钢中,由于合金元素对火花的形状、颜色产生不同的影响,可形成特有的颜色和花形特征。因此,据此可大致鉴别出合金元素的种类和含量,但不如碳素钢鉴别那样容易和精确。

### 二、火花鉴别的设备和方法

火花鉴别使用的主要设备为砂轮机,有手提式和台式两种砂轮机,通常选用 36 号~60 号普通氧化铝砂轮。

火花鉴别时要备有相对应的标准钢样,以便在试验过程中对有疑问的样品进行比较,以防操作错觉和误判。

火花鉴别是以火花的形状及颜色为依据的,所以试验者应戴无色平光防护镜,宜在暗处进行,光线不能太强,以免光线直射影响火花的色泽和清晰度。

砂轮转速宜控制在 2 800~4 000 r/min,压力要适中,要使火花略高于水平方向发射,以便于仔细观测火花束的长度和各部位的花形特征。由于火花束的形成受砂轮线速度的影响,所以当砂轮磨损直径变小时,必须进行更换。

### 三、火花的形状和鉴别

火花各种特征形式如图 8-77 所示。

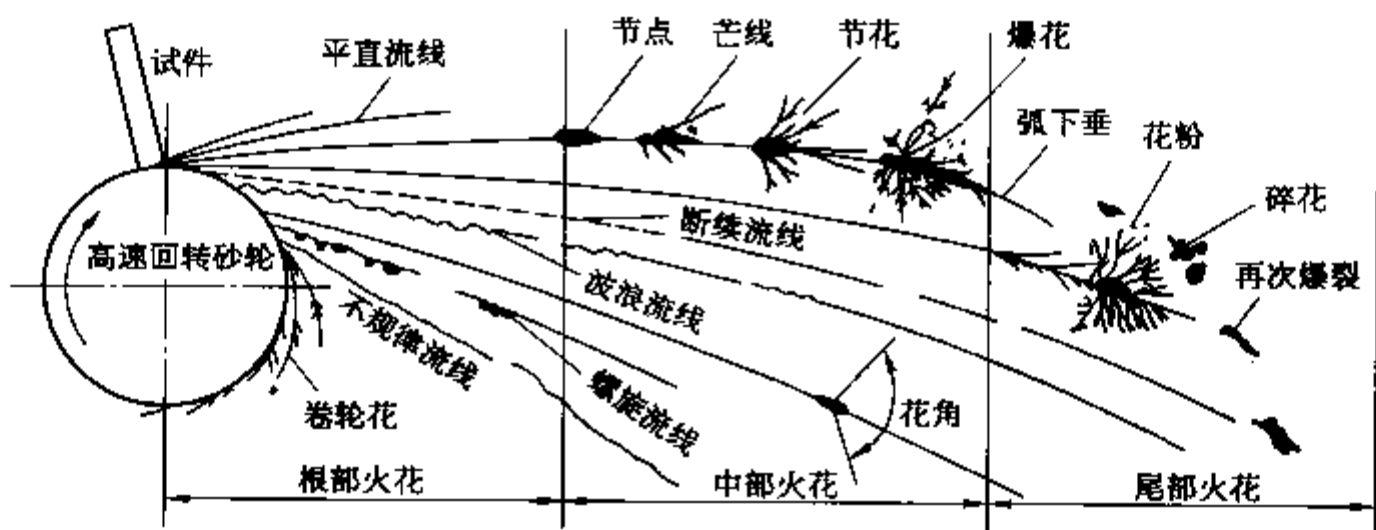


图 8-77 火花束各种特征形式

#### 1. 火花的形状

火花束由流线、节点、爆花、尾部花等部分组成。

1) 流线 由根部火花、中部火花、尾部火花三部分组成,通常有直线状流线、断续状流线、波纹状流线三种特征。碳钢都是直线状流线,铬钢高合金钢和灰铸铁等均为断续状流线,波纹状流线不常见,有时在高速钢火

花中会夹有波纹状流线。

2) 节点、芒线、节花 流线中途爆裂的地方叫节点,节点温度较流线其他部分为高。爆裂当时发出的若干聚集短线叫芒线,芒线分二根分叉、三根分叉、四根分叉及多根分叉。芒线中途又生节点并射出芒线,这样形成的花叫节花。一次爆裂的芒线叫一次节花,在一次芒线上又发生爆裂时形成的爆花叫二次节花,所以爆花可分为一次节花、二次节花、三次节花,爆花特征形式示意图见图8-78。

碳素钢碳的质量分数与流线中爆裂的节花次数有关,一般 $\omega_c$  0.25%以下的碳钢全是一次节花,流线上出现二次节花一般为中碳钢,流线上出现三次节花特征的火花对应 $\omega_c$  大于0.45%的碳钢。碳的质量分数越高,三次节花越多,火束越亮、越短。三次节花里有许多花蕊叫花粉。

3) 尾部火花 是流线末端特征,尾花特征如图8-79所示。

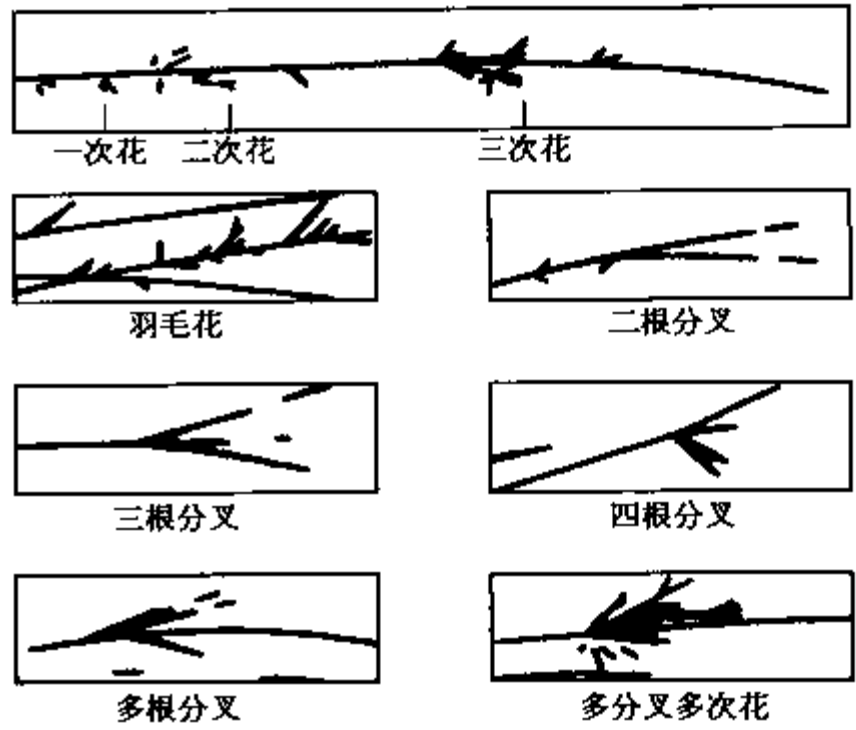


图8-78 爆花的各种形式

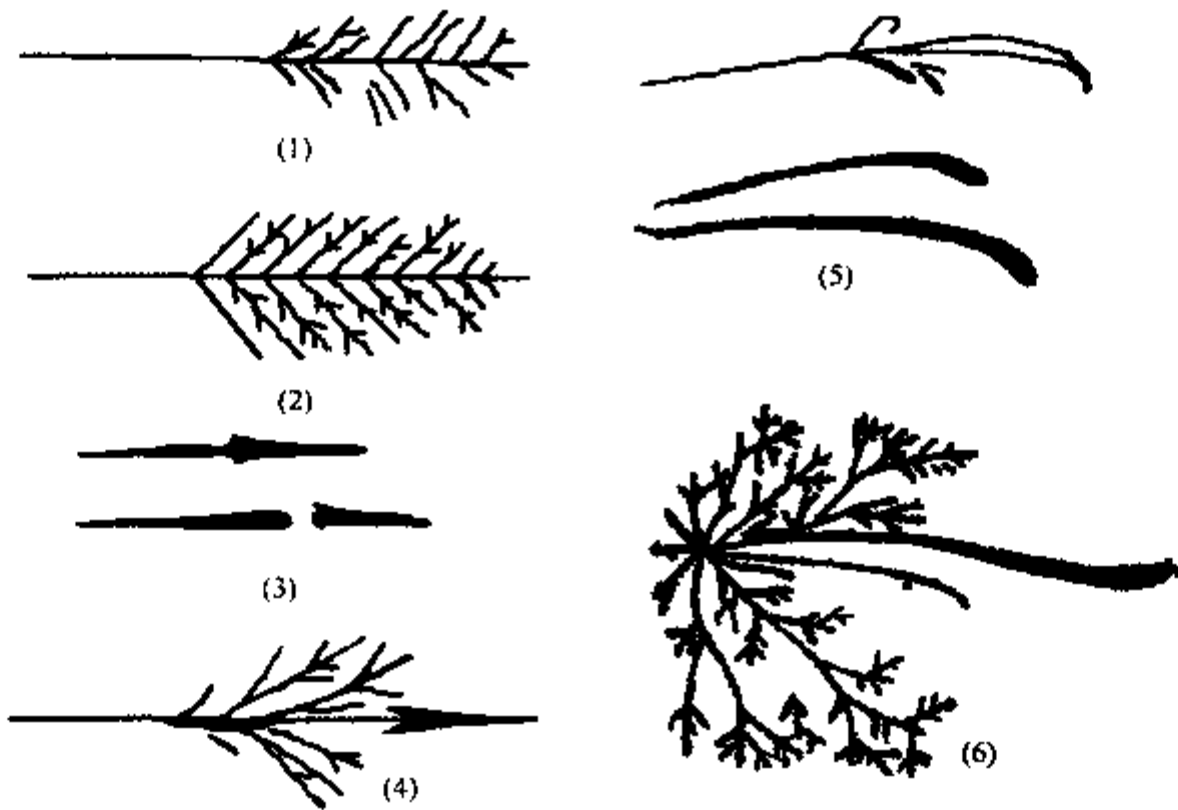


图8-79 尾花特征

- (1) 羽尾花: 表示铸铁;流线细而短呈橙红色或暗红色。
- (2) 直羽尾花: 表示是含硅很少的碳钢;芒线呈直线形状,色亮白、稍带橙色。
- (3) 枪尖尾花: 表示是含钨的钢;含钨越多,竹叶和流线脱离得越远;流线呈橙红色,尖端成竹叶形状。
- (4) 苞尾花: 表示是铬钨钢和高锰钢;形状像喇叭花,色黄,有时是橙红色。
- (5) 狐尾花: 表示是钨钢和高速钢。
- (6) 菊尾花: 表示是铬钢;流线末端裂成菊花形状,芒线和节花分岔极多,花粉密,分岔上有小花,颜色橙黄。





单花形式,爆裂角度较大,芒线粗长,并有明亮节点,有时出现一、二枝二次爆花的芒线。

$\omega_c$  0.40%~0.50%的碳钢,火花束色黄而较明亮,流线较细长,量多且直;爆花呈多分叉二次花,爆裂强劲,在流线尾部及中尾部有节点;大型爆花后有二、三层枝状爆花,爆花量较多而密集,并带有少量花粉,芒线较细密而长,根部有小型爆花与稍暗的流线交织着。

$\omega_c$  为 0.60%的碳钢,火花束流线挺直而强劲且量多而细长,尖端分叉;大型爆花多,位于流线尾端,爆裂强劲;大型爆花后有强的枝状爆花;芒线细长且有较多花粉。火花束明黄色。

$\omega_c$  为 0.70%~0.80%的碳钢,火花束流线直而短细,量多;火花黄亮色,爆花为多根分叉,多量三次花,花形由基本的星形发展为三层迭开,花数增多,芒线细不甚密,芒线间花粉较多。

$\omega_c$  超过 0.80%的碳钢,随着碳的质量分数增加,火花束流线增多的趋势逐渐缓慢,流线逐渐变多变细,火花束较前更短而粗,颜色由橙黄色变成暗橙色,爆花和花粉缓慢增多,花形逐渐缩短。

## 2. 合金元素对火花特征的影响

在碳钢的基础上加入合金元素,合金元素将对钢的火花特征产生影响,部分合金元素在火花中的特征及其对碳素钢火花特征的影响见表 8-56。

表 8-56 部分合金元素对火花特征的影响

合金元素	对爆裂的影响	流 线					爆 花			特 征	触感抗力
		根部色泽	色泽	长短	粗细	多少	多少	芒线	花粉		
Mn	助 长	黄	白亮(低C) 黄亮	低Mn长 高Mn短	粗	低Mn多 高Mn少	多而 整齐	白色, 细长	(高C) 多		
低Cr			白亮(低C) 明亮(高C)	低C长 高C短		低C多 高C少	较大		(高C) 有		
V			黄亮				多	细			
W	抑 制	暗红	橙红	中	细	少	少	红色, 秃尾	没有	断续流线狐尾	硬
Mo		深橙红		长	细		少	橙红色, 细	没有	枪尖( $\omega_{Mo}$ 1.0%,低C)	硬
Si			橙黄 (高Si)	短	粗		少	白色, 短	没有	流线尖端白亮点 (低C) 钩状尾花 (高Si低C)	不太硬
Ni			黄	短	细		少	黄色, 细	没有	流线上出现鼓肚 (低Ni,低C)	硬
高Cr			黄	短			较少	少			硬

1) 钨 由于钨的碳化物稳定性好、熔点很高,导热性较差,在钢粒飞离砂轮的运行过程中,与钢中的碳发生还原生成 CO 的反应受到抑制,所以在抑制火花爆裂元素中,钨的抑制作用最强烈。 $\omega_w$  达到 1.0%左右时,钢的爆花明显减少。当  $\omega_w > 2.5\%$  时,爆花呈秃尾状。钨对火花爆裂抑制作用,还和钢中的其他元素及含量有关。如含碳量低时, $\omega_w$  4%~5%的钢就几乎完全抑制火花的爆裂。钨钢火花流线尾端呈狐尾花。当  $\omega_w$  在 1%~2%时,狐尾花最为明显,随  $\omega_w$  的逐渐增加,流线的数量及长度将逐渐减少。 $\omega_w$  在 5%~8%的钢,狐尾花时有时无; $\omega_w$  更高时,狐尾花就很少出现,甚至完全消失。另外,由于钨的存在会使钢的火花色泽变暗。当  $\omega_w > 5\%$  时,火花几乎全部呈暗红色。钨钢火花的色泽不仅与  $\omega_w$  有关,还与  $\omega_c$  有密切关系。 $\omega_c$  越高,钨钢火花的红暗色就越早出现。

2) 钼 钼具有较强的抑制火花的爆裂、细化芒线和加深火花色泽的作用。钼钢的火花色泽是不明亮的,当 $\omega_{Mo}$ 较高时,火花呈深橙色,高钼钢没有枪尖花。钼钢枪尖花出现不仅与 $\omega_{Mo}$ 有关,还与 $\omega_C$ 有关。 $\omega_C$ 越低,枪尖花越明显,钼钢中 $\omega_C$ 在0.5%左右时,枪尖花就不易出现。

3) 硅 硅抑制火花的爆裂作用较钼弱,当 $\omega_{Si}$  2%~3%时,这种抑制就较明显。由于硅存在能使火花爆裂芒线变短,如钢中 $\omega_{Si}$  3.5%~4.5%、 $\omega_C$ 在0.10%左右(如硅钢片)时,就只能在火花束中发现一、二根单芒线的爆花,并出现白色明亮的闪点。硅锰弹簧钢流线粗而短,芒线少且短粗,火花色泽呈橙红色。

4) 镍 镍对火花爆裂的抑制作用较弱,使火花束缩小且不整齐,芒线较碳钢细。镍能细化流线,随 $\omega_{Ni}$ 提高,流线数量和长度将减少,色泽变暗,低镍钢的特征是流线上出现鼓肚,但 $\omega_C$ 较高时(0.5%以上)时此现象消失。

5) 铬 铬对火花的影响比较复杂,对于低铬低碳钢,铬对火花有较强的促进作用,火花呈亮白色,并增加流线数量和长度;爆花为一、二次花,花型较大。由于低铬能助长爆裂,如不细心,会将该钢的 $\omega_C$ 估计过高。对于 $\omega_C$ 较低的低铬钢,铬能助长爆裂的作用不显著,甚至能阻止枝状爆花的发生,流线短而量少,火花束仍然明亮。加入多量铬以后,无论爆裂强度、流线长度和数量都将减少,色泽也变暗,若钢再含有抑止和助长爆裂其他元素,则判别就变得更加复杂。因此,判断铬的含量必须要有丰富的经验,或用其他方法配合进行鉴定。

6) 锰和钒 锰钢火花的爆裂强度强于碳钢,爆花位置比碳钢离砂轮远。当钢中 $\omega_{Mn}$ 稍高时,火花较整齐,颜色也比碳钢黄亮;在 $\omega_C$ 较低时呈白亮色,爆花核心有较大而亮白的节点,花型较大,芒线稀、长而细;当 $\omega_C$ 较高时,爆花有较多的花粉。低锰钢的流线粗长,量较多;高锰钢的流线粗短而量较少。由于锰是促进火花爆裂的元素,所以有时会把钢的 $\omega_C$ 估计偏高,因而对 $\omega_C$ 较低的钢进行判别时应加以注意。

## 五、常用钢火花图谱

图8-80~图8-91是一组钢种的火花图谱。

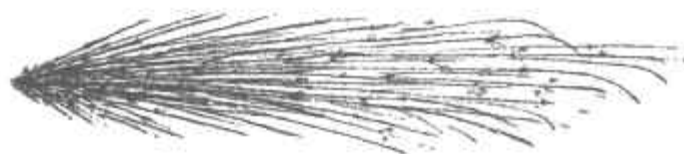


图8-80 20钢火花

(1. 可认出有3根破裂2段开花; 2. 从整体看,流线明显)

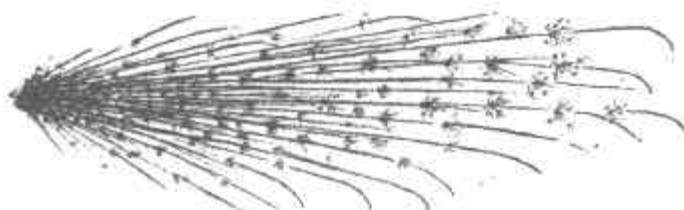


图8-81 40钢火花

(1. 有数根破裂3段开花以上,形成大而复杂的破裂; 2. 流线显得细)

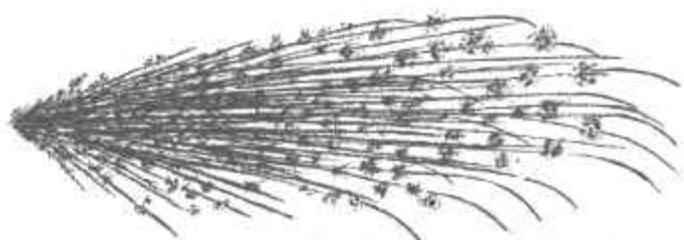


图8-82  $\omega_C$  0.9%~1.2%碳钢火花

(1. 破裂极小,数量非常多; 2. 流线短,并更带些红色)



图8-83 20CrMo钢火花

(在20钢的特征上认出有Mo特征的枪尖尾花)

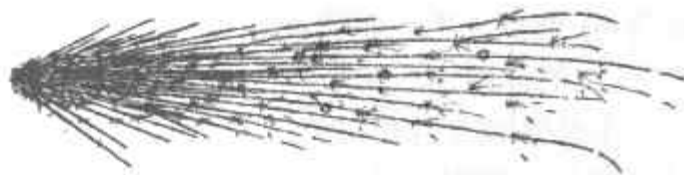


图8-84 18CrNiMnMoAl钢火花

(1. 从根部到中央有独特的鼓肚苞火; 2. 从根部开始,中央有鼓肚苞火的特征; 3. 流线根部略为暗,Mo的枪尖尾花明显)



图8-85 60Si2Mn钢火花

(1. 流线的顶端略为粗大; 2. 全体为黄色; 3. 不鲜明,但产生Si特征的苍白果实状爆花; 4. 破裂形状细小)

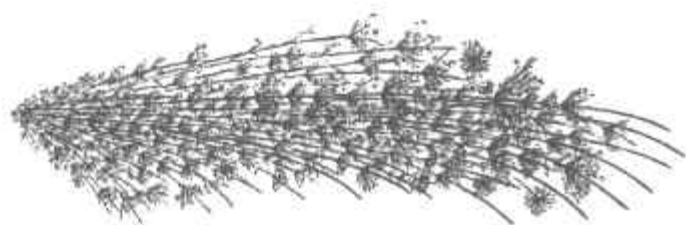


图 8-86 55CrMn 钢火花

- (1. 火花全体略为明亮; 2. 活泼的破裂, 破裂形状锐利;
3. 有星状破裂; 4. 破裂大小有相同感)

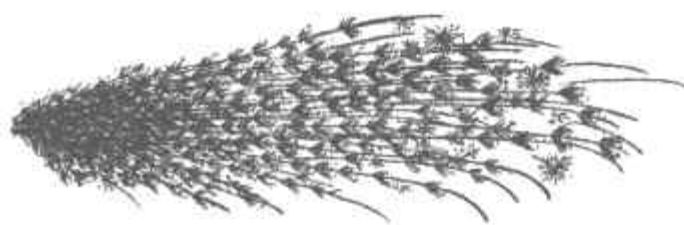


图 8-87 GCr15 钢火花

- (1. 碳素破裂多而活泼; 2. 流线显得细小;
3. 从中央到顶端部位带有花粉, 与  $w_C$  0.9%~1.2% 的碳钢相比, 根部的破裂略明显)

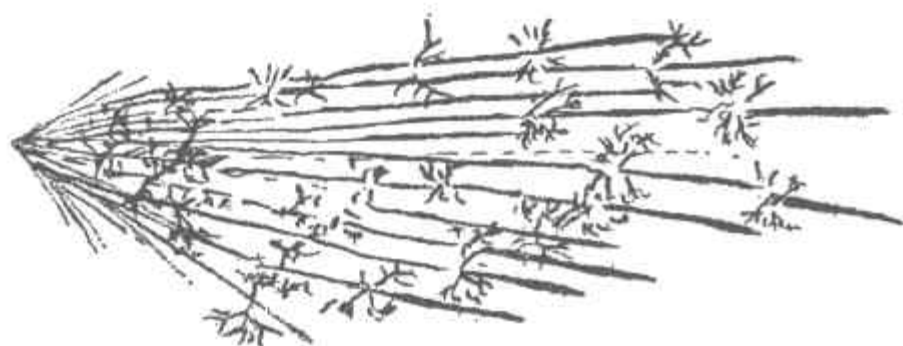


图 8-88 9CrWMn 钢火花

- (1. 裂花多, 无碳素破裂;
2. 流线细, 颜色为暗红色;
3. 能辨明带白须的枪状)



图 8-89 W18Cr4V 钢火花

- (1. 只有断续波状流线, 且短;
2. 有裂花, 顶端部位能辨明小滴;
3. 全体为暗红色, 无碳素破裂)



图 8-90 4Cr5MoSiV 钢火花

- (1. 顶端部位带花, 其前部能辨明鼓肚苞; 2. 无小滴;
3. 颜色为暗红色, 断续波状流线比 W18Cr4V 略为粗大, 且明亮)



图 8-91 Cr12MoV 钢火花

- (1. 流线细而短;
2. 能辨认大量的小菊花状)

## 第七节 热处理件相关失效分析方法

### 一、失效和失效类型

当各类机械产品或其部件、元件失去其应有功能时, 则称该产品或部件、元件失效。

机械零部件的失效类型一般可分为: 变形失效、断裂失效、磨损失效及腐蚀失效四种。

#### 1. 变形失效

金属零部件在外力作用下产生形状和尺寸的变化称为变形。当变形量超过设计要求时, 则称变形失效。在不很高的温度条件下, 变形失效又可分为弹性变形失效(变形过量或丧失弹性功能)和塑性变形失效(变形过量)。在高温条件下发生变形则称为蠕变失效或热松弛失效。

#### 2. 断裂失效

金属零部件在应力作用下材料分离为互不相连的两个或两个以上部分的现象称为断裂, 包括开裂——内

部或表面的裂纹及断开。断裂失效按分析需要有多种分类方法,见表 8-57。

表 8-57 断裂失效分类一览表

分类方法	断裂类型
断裂前变形程度	韧性断裂、脆性断裂
造成断裂的应力类型	正断、切断
断裂过程中裂纹扩展路径	沿晶断裂、穿晶断裂、混晶断裂
负荷性质及应力产生原因	疲劳断裂、环境断裂(应力腐蚀、氢脆等)
微观断裂机制	解理断裂、沿晶(或弱化区)断裂、韧窝断裂、疲劳断裂、蠕变断裂

金属材料的断裂过程一般经历三个阶段:裂纹萌生、裂纹失稳扩展以及最后断裂。其中裂纹启动萌生的内、外原因是失效分析的研究重点。

### 3. 磨损失效

金属零部件相互接触并作相对运动,在接触应力作用下,由于物理和化学作用,造成表面金属位移及分离,使表面形状、尺寸、组织及性能发生变化的过程称为磨损。零部件组成机械后总存在相对运动、相对磨损,且往往是一个逐渐发展过程,当磨损使零部件丧失原设计功效时则称磨损失效。

由于零部件磨损是一个复杂过程,涉及接触表面状态、环境介质、载荷特性、运动特性等各方面因素;同一磨损过程往往可能存在互不相关的几方面机理。因此磨损失效类型至今无统一分类方法,目前一般按磨损机理将磨损失效分为:粘着磨损失效、磨粒磨损失效、腐蚀磨损失效、疲劳磨损失效、冲蚀磨损失效及微动磨损失效等。

### 4. 腐蚀失效

金属零部件表面因发生化学或电化学反应而引起损伤,并使其丧失原设计功效的现象称为腐蚀失效。金属的腐蚀是一个复杂的累积损伤过程,按不同的分类原则可分为不同的腐蚀类型,常用分类方法见表 8-58 所示。

表 8-58 腐蚀失效分类一览表

分类原则	腐蚀类型	
腐蚀历程	化学腐蚀、电化学腐蚀、物理腐蚀	
腐蚀环境条件	工业介质腐蚀	酸碱盐腐蚀、硫化氢腐蚀、氢腐蚀、冷却水腐蚀等
	自然环境腐蚀	大气腐蚀、海水腐蚀、土壤腐蚀等
腐蚀形貌	全面腐蚀	均匀腐蚀、腐蚀(较)均匀布表面、构件厚度逐步变薄
	局部腐蚀	点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳、磨损腐蚀等

## 二、失效分析基本思路

零部件失效分析的目的是找出导致零部件失效的原因及其影响因素,由此制定改进及防患措施,以防同类失效现象重复发生。

零部件的失效过程往往是多因素协同、损伤累积的过程,其“因”与“果(失效)”往往不是单一对应关系,常是一“果”多“因”(当然有主、次)。而具体的失效分析任务往往责任重、时间紧,有时还有试样有限等约束,这要求首先必须有一个正确的失效分析思路来指导分析全过程,才能减少失效分析工作中的盲目性、片面性和主观随意性,提高工作的效率和质量,获得本质认识。

### 1. 几种失效分析思路

1) 按失效类型的分析思路 首先判断失效类型,再分析推断失效原因。如轴的断裂失效,往往先确定是疲劳断裂还是过载断裂,然后在开裂起源处分析推断萌生裂纹的原因。这是应用较多的一种分析思路。

2) 逻辑推理分析思路 以现实的失效事实信息为前提,根据失效分析基础理论及判据,通过严谨逻辑思维,推断出零部件失效的过程和原因。实际上,在失效分析的各个阶段都可用推理方法,一系列的推理链组成了失效

分析全过程。常用的逻辑推理方法具体有：归纳推理、演绎推理、类比推理、假设性推理和选择性推理等。

3) 全因素失效分析思路 一个零部件从原材料直到失效,其中要经历许多环节:设计、选材、金加工、热加工、安装、使用、环境等。对每个环节可能出现的问题进行分析,逐个因素排除,最后找出失效主要原因。这种分析思路工作量往往很大,一般用于大型复杂系统失效分析的前期工作,可初步确定与失效相关的一二个环节;也常用于仲裁分析中,对有关环节的各方都有一个评估,确定主要原因。

4) 失效树分析法(FTA) 从结果到原因描绘事件发生的有方向逻辑路径(主干及分支)→逻辑树,是一种图形演绎分析方法。它可围绕某些特定的状态作层层深入分析,表达系统内在联系,指出失效件与系统间逻辑关系。定性分析可找出系统的薄弱环节,确定事故原因的各种可能组合方式。由于这种思路往往止于定性分析,因此常用于失效分析工作的后期,作为辅助的审查方法以发现失效分析中的漏洞。

## 2. 分析思维过程的基本原则

不同的零部件失效事件可选择不同的失效分析思路,采用不同的分析手段,但为保证失效分析工作的顺利、结论可靠,具体分析思维应把握一些基本原则。

1) 整体观念原则 把失效件放到“人、机、物、料、环”的整体环境中考察,找出相互间的互动关系,逐个核对排查从整体考虑列出的可能性问题。

2) 从现象到本质的原则 从失效现象可推断出失效类型,但还没找出失效原因,必须深入研究分析,找出失效本质,才能提出有效防止再有同类失效的措施。

3) 动态性原则 失效过程常常是一个渐进、动态累积的过程,分析思维中要考虑到“装备—环境—人”是动态的、互动的。

4) 两分法原则 对任何事物、事件、相关人证、物证应坚持两分法思考,即要考虑正与反、利与弊、好与坏等两方面的作用、影响等。

5) 紧抓信息异常的原则 零部件失效过程中必然有一系列异常因素、异常变化、异常现象、异常后果等,这些异常信息是系统失控的客观反映。必须抓紧这些异常信息,它们是达到正确分析的必要条件。

## 三、失效分析基本程序

零部件的失效分析过程犹如破案过程,其分析过程的复杂性、困难性在接受任务时往往难以预料。为保证失效分析工作顺利而有效地进行,首先必须制定一个科学而严密的分析程序。尽管零部件失效情况千变万化,分析要求不尽相同,因而难以规定一个统一的具体程序,但仍可归纳出基本分析程序。

### 1. 明确分析要求

具体零部件失效分析的目的不同,其分析的深度和广度也不尽相同,因此其着力研究的方向也不相同。如有的仅需分析失效类型,有的要求分清责任(仲裁),有的要求分析原因并提出改进措施等。因此首先应根据要求制定最经济的方法,以取得最能满足需求的分析结果。

### 2. 收集、归纳失效件的现场、背景信息

(1) 了解失效件的服役环境、运行过程及失效过程,并把整体形貌(环境)拍摄记录。

(2) 对失效件的失效部位、失效处宏观形貌进行检测并拍摄记录。

(3) 了解失效件的材质、设计、工艺过程等背景信息。

(4) 根据对现场收集的失效件(碎片组合等)进行宏观检测分析,选取实验室检测分析样品(注意编号),特别注意对失效部位(断口等)的保护。

### 3. 失效件的检测、分析

(1) 失效件的材质成分检测。

(2) 进行失效处(损伤面或断裂面等)组织分析(金相分析)、形貌分析(电镜分析)、异常微区(夹杂、腐蚀等)成分分析(能谱分析)等。

(3) 根据需要进行力学性能检验、探伤检测或残留应力测定等。

(4) 根据需要进行应力分布分析。

### 4. 综合归纳提出分析结论

根据宏观、微观的检测分析结果及一些基本判据,有时还要根据力学(应力分布)分析,结合分析经验,参考



历史案例,综合归纳出失效形式和失效原因。

#### 5. 出具报告

失效分析报告至少应包括以下内容:失效件的基本信息、所进行的检测分析及结果、推断过程及结论。

### 四、热处理件常见缺陷及对失效行为的一般影响

热处理工件在热处理中发生的缺陷若未被及时发现而投入使用,必然导致直接失效或间接引发失效,常见热处理缺陷的成因及对失效行为的一般影响见表 8-59。

表 8-59 热处理常见缺陷、成因及对失效行为一般影响一览表

缺 陷	成 因	对零部件失效行为一般影响
表面氧化、脱碳	金属在高温过程中与氧化性气氛(氧、水汽、二氧化碳等)作用,使表层金属氧化、表层基体中碳元素损失(脱碳或半脱碳)	1) 表面硬度不足,发生早期磨损 2) 易引发淬火开裂 3) 易诱发表面开裂成为疲劳开裂源区
过热	热处理中加热温度过高或保温时间过长,导致奥氏体异常长大的现象,形成粗大魏氏组织、粗大马氏体等	使材质脆化,力学性能下降,会导致淬火开裂或运行中断裂
过烧	热处理过程中温度过高,使晶界上出现局部氧化或熔融现象。常发生在高速钢和铝合金的热处理过程	1) 极易造成淬火开裂 2) 材质极度脆化而报废
碳化物或铁素体沿晶成网分布	过共析钢(包括渗碳层)中的碳化物或亚共析钢中的铁素体由于热处理中温度过高、冷却过慢造成沿粗大晶界析出,形成网状组织	1) 材质力学性能恶化,容易引发沿网发展的脆性开裂 2) 对渗碳齿轮,碳化物网状分布极易引发齿面早期剥落失效
粗大马氏体和过量残留奥氏体	渗碳过程或高碳(合金)工具钢淬火过程中,加热温度过高,保温时间过长,奥氏体中碳及合金元素浓度增加,Ms点下移,淬火后马氏体粗大及残留奥氏体过量	1) 使工件脆性增大,硬度下降 2) 在表层磨削中容易诱发磨削裂纹
回火脆性	钢铁材料通常在 250~370℃ 范围(第一类)或在 450~570℃(第二类)范围内回火后,出现冲击韧度或断裂韧性降低现象	1) 造成工件脆化 2) 极易造成脆性断裂
石墨化	弹簧钢或碳素工具钢在退火处理时,温度过高、保温时间过长、冷却缓慢(或多次重复退火),使钢中渗碳体发生石墨化过程,在石墨周围形成大块铁素体	1) 造成工件硬度不足,脆性增加 2) 造成工件,尤其弹簧使用中发生脆断
内氧化	合金在热处理中,在表层沿晶界形成氧化物相现象,其深度可达十几微米。内氧化的形成主要与加热气氛组成有关,也与合金组成相关。钢铁材料的气体渗碳和碳氮共渗层中常可见内氧化缺陷	表层晶界氧化,造成表层晶界弱化,成为工件表面开裂、剥落、疲劳开裂的源区
淬火裂纹	热处理过程,当组织应力与热应力叠加超过材料断裂强度时,即会发生开裂。 表面脱碳常会造成表面龟裂。缺陷处、凹槽、尖角、缺口处常因应力集中而引发开裂。 局部表面淬火,组织严重偏析处,冷却控制不当也容易发生开裂	1) 造成工件直接报废 2) 成为工件服役中脆断的诱发隐患
淬火软点(带)	局部脱碳(残留)或局部冷却不足(冷却介质不均匀等)造成工件淬火后表面出现硬度相对过低的小区域	1) 造成工件早期磨损 2) 软点(带)处有可能成为疲劳开裂源区

### 五、裂纹的基本分析

裂纹是一种不完全断裂缺陷。裂纹在金属内发展往往呈不规则的曲面形态,即是三维的,但在外表、在截面上则是二维的(在圆柱面上是局部三维的),因此从裂纹探究开裂过程总有信息不充分现象。所以,有时把裂纹打开后从断口角度来研究断裂过程更为方便、更全面些。裂纹分析的目的是通过确定裂纹走向,找出裂源,进而确定产生原因。

#### 1. 裂纹的起因

裂纹的起因主要可归结于应力因素,具体可分为:

- (1) 工件的局部结构形状引起应力集中,如台阶转角、截面突变处等;
- (2) 材料缺陷引起的内应力集中,如表面折叠、疏松、夹杂等;
- (3) 服役中应力过大引起应力集中,如超载、超温等。

#### 2. 裂纹的宏观检测

1) 宏观裂纹的显示 有时表面裂纹十分细小,目视难以观察分析,可采用着色探伤或磁粉探伤,使裂纹清晰显示,以便进一步分析。

2) 判别主裂纹 开裂过程中往往会产生二次或三次裂纹,找出主裂纹有利于判断开裂原因。判别主裂纹的方法主要有:T形法、分枝法、变形法,如图8-92所示;还有氧化法,即氧化腐蚀区为先期裂纹。

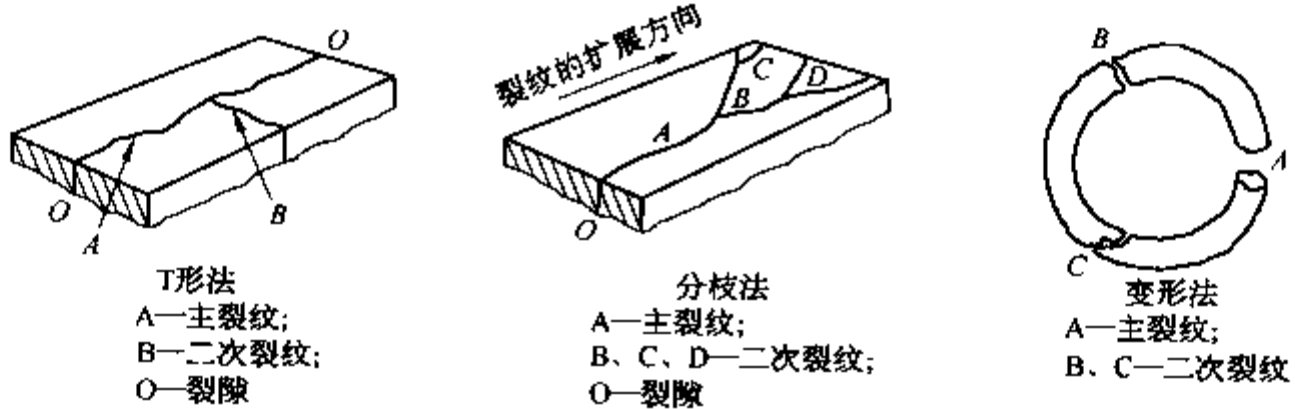


图8-92 主裂纹判别方法

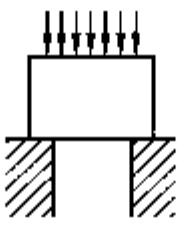

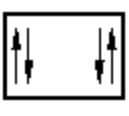

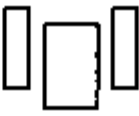
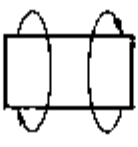
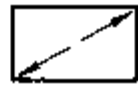
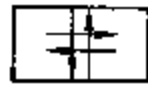


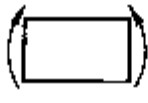




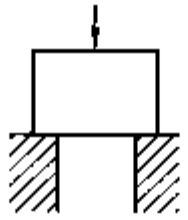




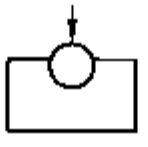




3) 判断受力状况 工件在不同应力状态下其变形方向和发生断裂时的形式不同,见表8-60所示。一般可通过裂纹的分布形态推断出工件断裂区域的负荷类型。

表8-60 不同类型负荷下的变形方向及断裂形式

负荷类型		变形方向		断裂形式	
		正向	切向	正断	切断
拉伸					
压缩					



(续表)

负荷类型		变形方向		断裂形式	
		正向	切向	正断	切断
剪切					
扭转					
纯弯曲					
切弯曲					
压入					

### 3. 裂纹的微观基本特征

裂纹一般总倾向沿最小阻力路线、即金属材料的薄弱环节或缺陷处扩展,在扩展的路径上总会留下一些痕迹,反映这些信息。在各种裂纹的二维平面微观形貌中,可归纳找出一些反映裂纹特征的要素以供分析、判断,如微观形态、走向(沿晶、穿晶)、周边组织形貌(裂面是否氧化、脱碳、有无夹杂等)、尾端形貌(圆浑或尖锐)、裂纹两侧的匹配耦合状况等。

### 4. 常见裂纹的基本特征

与热处理工件相关的(锻造、热处理、磨加工、使用等)常见裂纹基本特征见表 8-61。

表 8-61 与热处理工件相关常见裂纹基本特征一览表

裂纹类别	宏观特征		微观特征				备注	
	形态	起源位置	走向	周边组织形貌	尾 端	其他特征		
热处理裂纹	淬火龟裂	网状、龟裂	脱碳表层	沿晶扩展	裂纹表层很少氧化,周边为铁素体	一般纤细	一般限于脱碳层内	一般较浅
	淬火直裂	轴向、直线状	应力集中处或夹杂、带状组织处	穿晶扩展为主	裂纹表层很少氧化、脱碳,可能与带状组织平行	尖锐	可能找到与开裂相关的夹杂	常出现于细长工件
	过热开裂	网状或弧形	应力集中处或缺陷处	沿晶扩展	裂纹表层很少氧化、脱碳	尖锐	组织粗化或其他过热形貌	
	其他淬裂	一般呈弧形	应力集中处或组织过渡区	穿晶扩展为主	裂纹表层很少氧化、脱碳,可能嵌有夹杂	尖锐	裂纹两侧可能组织明显差异	在表面,也可能在内部
锻造裂纹	过烧开裂	鱼鳞状或龟裂	表层或形状突变处	沿晶扩展	裂纹表层有氧化、脱碳	严重时为豆渣状	基体有过热特征	
	加热不足	放射状爪形	锻件心部	穿晶扩展	裂纹表层有时有氧化、脱碳现象	细、钝,若热处理则圆浑	一般裂纹两侧不甚匹配	高合金钢常有碳化物偏析
	脆裂	龟裂或鱼鳞状	表面或应力集中处	沿晶扩展	缝内可见硫化夹杂或铜夹杂	若经热处理后则圆浑	晶界有硫化物或铜相	局部硫化物或铜含量超标
磨削裂纹	龟裂或辐射状,有规律排列	主要在磨削层内,与磨痕垂直	主要沿晶扩展	缝内可能有氧化	纤细或呈分叉喇叭状	一般裂纹两侧匹配不明显,磨削表层可见二次淬火或回火层		
使用裂纹	疲劳裂纹	一般无大起伏	一般在表面应力集中处	以穿晶扩展为主	裂纹表层无氧化、脱碳,有时呈锯齿状分布	纤细		
	过载开裂	与主应力方向垂直分布	一般在应力集中处	穿晶扩展	裂纹表层无氧化、脱碳	纤细		

## 六、宏观断口的基本识别

断口上记录着金属断裂的起始、扩展直至断开全过程的各种信息,通过对这些信息的分析,即断口分析,可推出断裂的原因和各影响因素。断口分析可分为宏观分析(即目视或在 10 倍以下放大镜下分析)和微观分析(一般用扫描电镜在高倍率下分析)。

要进行断口的宏观分析,必须了解宏观断口的花样、花纹、色泽等断口的要素、特征。

### 1. 宏观断口特征的三要素

钢的光滑圆试样拉伸断口,通常可分为三个区域:纤维区、放射区和剪切唇,一般称为断口特征三要素,如图 8-93 所示。

1) 纤维区 一般位于断口中央,呈粗糙纤维状,为裂纹核心形成区。在应力作用下形成显微空洞,并不断长大,相互连接发展,留下纤维状形貌。

2) 放射区 在纤维区外延方向,有明显的放射状花样,呈脊状突起长条,放射方向与裂纹扩展方向一致,逆指裂纹源。

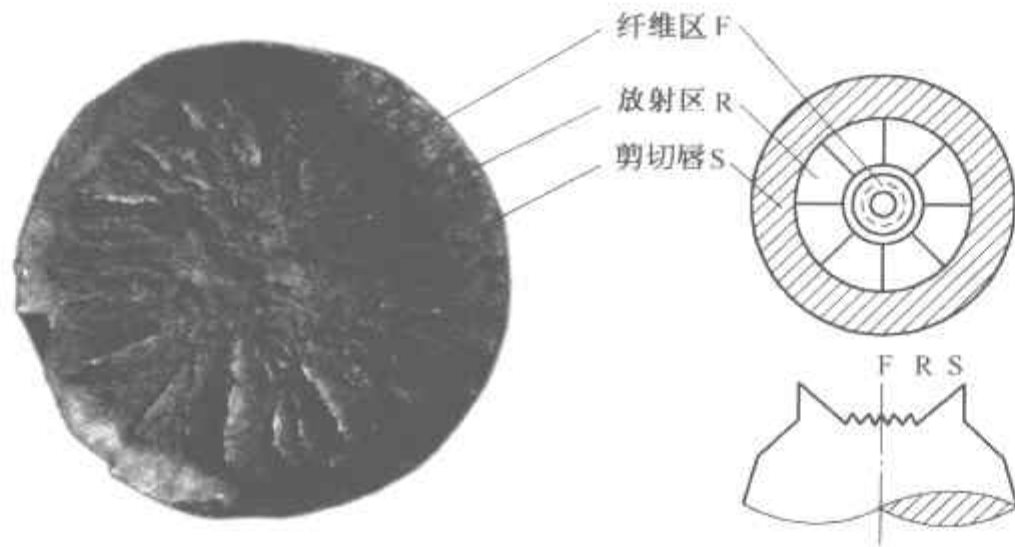


图 8-93 光滑圆柱样拉伸断口

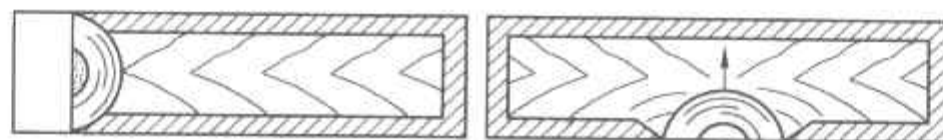
3) 剪切唇 一般在断裂最后阶段形成区域,其表面相对光滑,与拉伸应力轴交角约为  $45^\circ$ 。当对称断裂时,一侧断面上的剪切唇区域呈杯状,而另一侧呈锥状。

材质不同、试验条件不同则断口三区所占比例、相关形态均会发生不同。如纤维区较大,则表明材质塑、韧性较好;若放射区增大,则表明材料脆性增大;若试样外表带缺口,则可能不出现剪切唇。

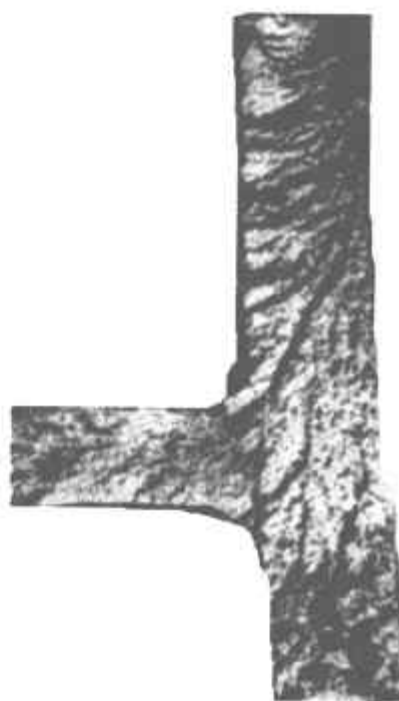
### 2. 人字纹及海滩花纹

当试样为矩形时,或试样在交变应力下逐步疲劳断裂时,会出现特殊的花纹。

1) 人字纹 扁平试样在断裂过程中,裂纹主要沿宽度方向扩展,则在放射区形成对称的人字纹,人字纹的尖顶指向纤维区,即指向裂纹源,这也是寻找裂源的基本判据之一。当然,这还要结合具体约束条件,不是一成不变的,如图 8-94 所示。



(a)



(b)

图 8-94 人字纹

(a) 缺口矩形拉伸试样断口; (b) 实物断口

2) 海滩花纹 试样在低于其材质强度的交变应力下萌生裂纹并逐渐扩展,在断面上会留下由源区为圆心的弧形推进条纹,常呈贝纹状、蛤壳状或海滩花纹,它垂直于疲劳扩展方向。这种花纹是疲劳断裂的主要标志,如图 8-95 所示。

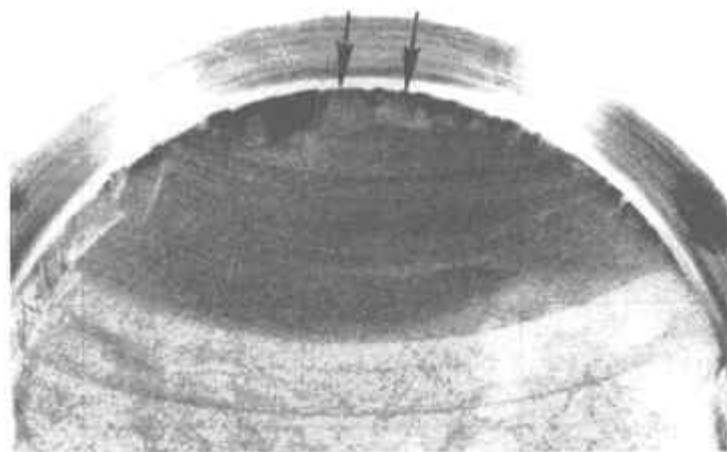


图 8-95 海滩花纹

3) 疲劳断口的基本组成 疲劳断口由疲劳核心(源)区、疲劳扩展区(海滩花纹区)以及瞬断区(最终快断区,常呈粗糙纤维状)组成。疲劳源区一般总处于缺陷处,如表面损伤区、夹杂区等,其源有时不止一个,称多源。同时,根据交变应力的频率不同,一般又分为高周疲劳和低周疲劳,如图 8-96 所示。

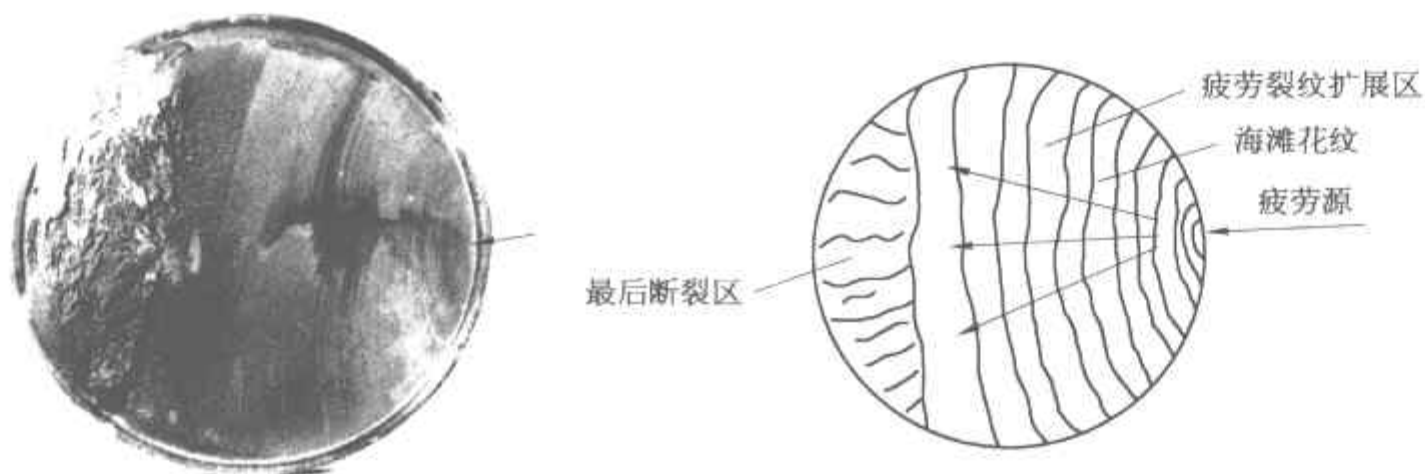


图 8-96 疲劳断口及三个区域示意图

### 3. 宏观断口的特征判断

分析宏观断口,一般从花样(花纹)、色泽、粗糙程度、方向等方面来研究其特征。

1) 花样(花纹) 根据断口上放射区与纤维区的相对比例,估计断裂性质,并由放射方向确定源区。由海滩花纹可判断疲劳开裂,并找到疲劳源;由人字纹,同样可确定开裂起始区。

2) 粗糙程度 不同材料、不同断裂方式断面的粗糙度会有很大不同。一般说,断面纤维状粗糙、起伏大,常表明断裂过程消耗功较大。

3) 光泽与色彩 不同断裂方式所形成的不同的小断面集合,会造成断口的光泽、色彩的变化,如粗纤维往往呈暗灰色,沿粗晶或解理面断裂时会有光亮小刻面闪烁。在腐蚀条件下,因腐蚀,断口色泽会随之变化。

4) 断面与最大正应力交角 不同应力状态、不同材料等条件下,断面与最大正应力的交角会不同。

5) 缺陷在断面上特征 材料中缺陷或环境异常条件,在断面的扩展中会留下一些特征痕迹。

### 4. 几种断裂方式的断口特征(表 8-62)

表 8-62 几种常见断裂方式的断口特征

断裂方式	韧性断裂		脆性断裂		疲劳断裂	
	正断型	切断型	缺口型	低温脆断	低周	高周
放射花样	不出现	一般不出现 (高强度钢会有)	明显	不甚明显	较不明显,板材上有近于平行的人字纹	极细
海滩花纹	无	无	无	无	应力大时明显	有(应力幅小时不明显)

(续表)

断裂方式 特征参量	韧性断裂		脆性断裂		疲劳断裂	
	正断型	切断型	缺口型	低温脆断	低周	高周
粗糙度	粗糙, 粗蚀 齿状	较光滑	粗糙	粗糙	较光滑	很光滑
色泽	暗灰色	较弱金属 光泽	白亮近金属 光泽	结晶状金属 光泽	在扩展区, 扩展慢则趋白亮	
与最大正应力 交角	呈直角	45°	直角	直角	扩展慢: 直角 扩展快: 约 45°	直角

## 七、微观断口的基本识别

金属断裂后,断口在电镜下的形貌虽是千变万化,但可归纳出其基本类型。任何断口都是一种或几种基本微观断口(类)或它们的变态按一定规律组合而成。微观断口一般分为沿晶断口、解理断口、准解理断口、韧窝断口、疲劳断口等。

### 1. 沿晶断口

沿晶断口是金属断裂时沿晶界表面发展而形成的断口,在电镜下可看到一颗颗晶粒,称为沿晶断口,如图 8-97 所示。沿晶断口通常归为脆性断口,也有按晶界表面的光滑程度分为脆性沿晶断口和韧性沿晶断口。沿晶断口的直观原因是晶界弱化,而造成晶界弱化的原因是多种多样的,因此又可进一步推断,如氢脆断口、应力腐蚀断口、回火脆性断口、过烧断口等。有些沿晶断口可根据晶界表面的特征可直接判断,如根据晶粒呈冰糖状及晶界表面出现发纹(爪纹)可判断为氢脆断口,如图 8-98 所示。而有些则要结合其他信息才能判断,如应力腐蚀则要结合能谱分析结果(腐蚀物)才能下结论。

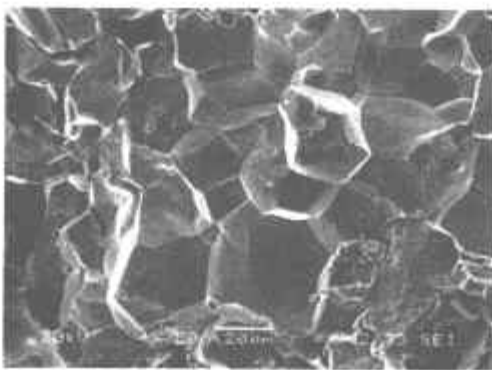


图 8-97 沿晶开裂断口形貌(SEI)

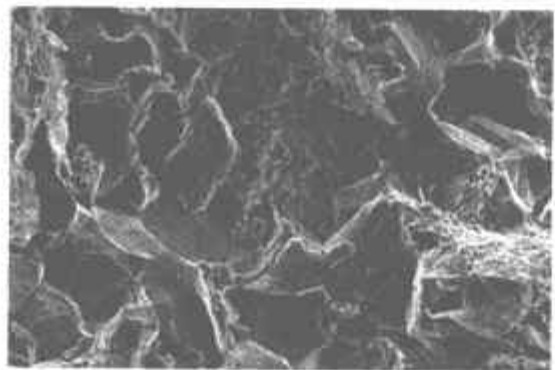


图 8-98 氢脆断口形貌(SEI)

### 2. 解理断口

解理断口是金属在应力作用下沿特定的结晶学平面发生分离的断口,在电镜下可看到层片状形貌,称为解理断口,如图 8-99 所示。从晶体学可知,由于密排面之间键合力最弱,故大多数解理面均为原子密排面。对于铜、铝、奥氏体钢等面心立方结构金属,由于存在大量滑移系,因此一般不发生解理开裂。

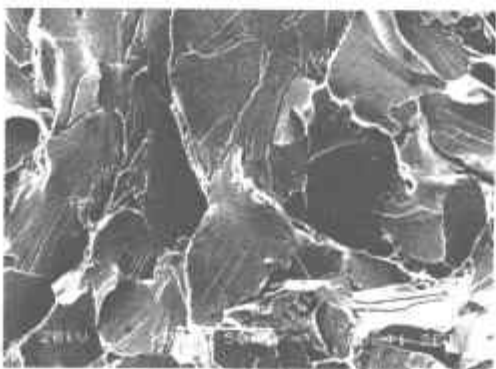


图 8-99 解理断口形貌(SEI)

解理开裂常归为脆性开裂,其扩展速度极快(可达声速),因此常造成突发事故。

由于实际应用金属是多晶体的且各晶粒位向不尽相同,同时基体内总不免存在位错、夹杂等缺陷,因此解理开裂扩展中会发生各种变故,在断口上会形成解理开裂的特征花样。

1) 台阶 解理裂纹沿若干不在同一平面的解理面扩展,部分基本平行的高低不同的解理面上裂纹相互连接,会形成台阶。



2) 河流花样 若干个解理台阶组合在一起,合成条纹,形如地图上的河流,这是解理断口最具特色的显微形貌。由河流方向(由分支汇入主流)可确定断裂源。

3) 扇形花样 由于解理面往往不是等轴的,若裂纹扩展方向与解理面伸长方向一致,就会形成扇状形貌。解理断口上还可看到“舌状花样”、“鱼骨花样”等其他微观特征。

### 3. 韧窝断口

韧窝断口属材料因局部区域的剧烈滑移面最终导致分离形成的断口,在电镜下可见成片的孔穴形貌,属于塑性或韧性断口。韧窝是由空穴长大和分离而形成的微坑,每个空穴对应一个韧窝。夹杂物或第二相质点常成为韧窝的成核点,故在韧窝底部常可见一颗质点。

韧窝的形状因应力状况不同而不同,在正交应力下,韧窝为等轴状,其大小不一定相同,称为正交韧窝,如图 8-100 所示。在剪切应力下韧窝呈拉长的抛物线状,韧窝的长轴都同一指向,两匹配断口上韧窝的指向相反,称为剪切韧窝,如图 8-101 所示;当两匹配断口上抛物线状韧窝的指向相同,则称为撕裂韧窝。

### 4. 准解理断口

准解理断裂形态介于解理断裂和韧窝断裂之间,其断口在低倍下呈现较平整,无塑变或小量变形,微观下可见近似解理断口上的细小刻面及细小放射状条纹等形貌,如图 8-102 所示。在高倍下,准解理断口中也能见到台阶、河流、舌状等形态。

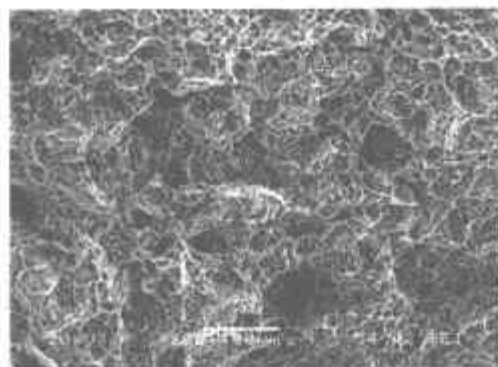


图 8-100 正交韧窝形貌(SEI)

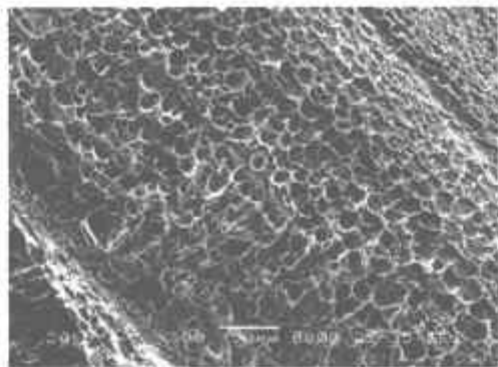


图 8-101 剪切韧窝形貌(SEI)

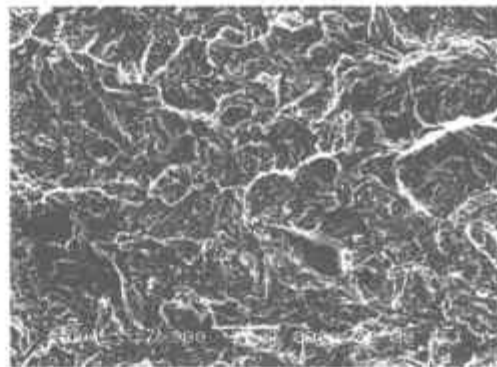


图 8-102 准解理断口形貌(SEI)

准解理断口常在淬、回火件及调质件上出现。

### 5. 疲劳断口

疲劳断口在宏观上可分为三个区域:萌生、扩展和瞬断;在微观上,在疲劳断口的扩展区域,常可看到独特形态——疲劳辉纹。疲劳辉纹是一系列基本上平行的略带弯曲的条纹,它与裂纹局部扩展方向相垂直,其凸弧指向扩展方向,如图 8-103、图 8-104 所示。

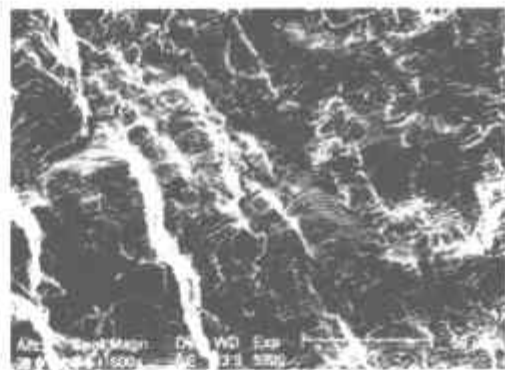


图 8-103 疲劳试验开裂辉纹(SEI)

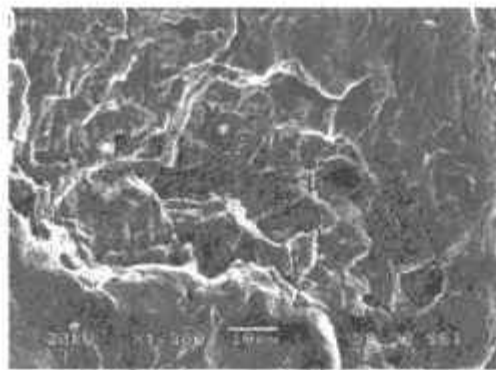


图 8-104 服役中疲劳断裂辉纹(SEI)

一般情况下,铝合金、奥氏体钢等面心立方晶格金属的疲劳辉纹较清晰,而体心立方晶格、密排六方晶格金属的疲劳辉纹相对不甚明显,如碳素或碳素合金钢的辉纹较短而不连续。

由疲劳辉纹可推断为疲劳断裂,但有的疲劳断裂不一定能发现疲劳辉纹。

## 八、热处理件的畸变及基本测量

在热处理过程中,工件各部位组织转变的不一致、热胀冷缩的不同步一般总会造成工件热处理后不同程度

的、不同形式的畸变：外径或内径发生膨胀或收缩、杆或轴发生弯曲、板体或盘件发生扭曲、齿轮或丝杆的齿形发生变形等，一些简单形状工件的畸变趋势参见第一章。这些畸变往往会影响其后续工序的正常进行，有的会造成报废。因此，控制热处理后的畸变量常常是热处理工艺质量要求之一。热处理畸变的检测，对于一般常规项目（平直度、跳动等）可用常规量具测量，对于有些特殊的变形项目（如齿形等）则要使用专用器具。

#### 1. 变形检测的注意事项

1) 明确执行标准及具体项目 首先要明确是按具体工艺技术要求，还是按推荐的行业工艺标准执行；其次还要明确控制、检测具体部位的畸变及畸变量；同时，热处理工作者应确认其可行性。

2) 明确测试部位、测试方法 热处理畸变是三维的，部位不同其畸变量也不同，因此要明确控制畸变的部位。同时，测量方法不同，其测量结果有差异，因此，要使检测结果有可比性、可重复性就必须明确部位和方法。

3) 必须重视热处理前的检测 工件在放置、运输过程中若控制不当也会造成一定程度的变形，因此应该在热处理前按工艺要求的部位方法测定原始数据，注意环境温度，并有效记录，这样才能在热处理后的检测中计算出真实的由热处理造成的畸变量。

4) 注意控制热处理后工件检测时的状态 检测时热处理后的工件的组织应基本稳定（尤其高合金钢应在回火后静置一定时间），工件表面应经清整，同时应控制检测时的温度（与热处理前检测时基本一致）。

#### 2. 热处理件畸变量检测的常用器具及方法

热处理件变形量检测是一种计量检测，其所用的长度计量器具必然应该在有效的检定期内方能使用。同时，检测器具与方法的选择应与热处理前检测相一致。

1) 内、外径检测 可按工件及技术要求选择适当量程、适当精度的游标卡尺、分厘卡、钢皮尺以及卡钳等辅助工具。

2) 长轴的平直度、跳动检测 在适于工件长度的平板上放置两块（有时可用一块）相当的 V 形块。被测工件放在 V 形块上，杠杆千分（或百分）表安装在正中位置或偏离正中的位置上，如图 8-105 所示。以 V 形块为支承点转动工件测量示值变化，再轴向移动千分表，找出最大跳动点。

3) 平面度检测 模板等板状工件常要控制热处理后的平面畸变（扭曲、翘翘）。把板状工件放在合适大小的检测平板上，检测平板的精度要适应检测精度，然后用塞尺（片）试探性寻找并塞入工件与检测平板间的间隙，按规定要求（部位）选择能塞入的最厚尺片，则该尺片厚度为该处畸变量。也可把工件用支承座支起，并用杠杆百（千）分表通过调整支承座使工件上平面与底平板基本平行，如图 8-106 所示，然后再用上述杠杆表检测相关各区域的差值，即为该区域的变形量。

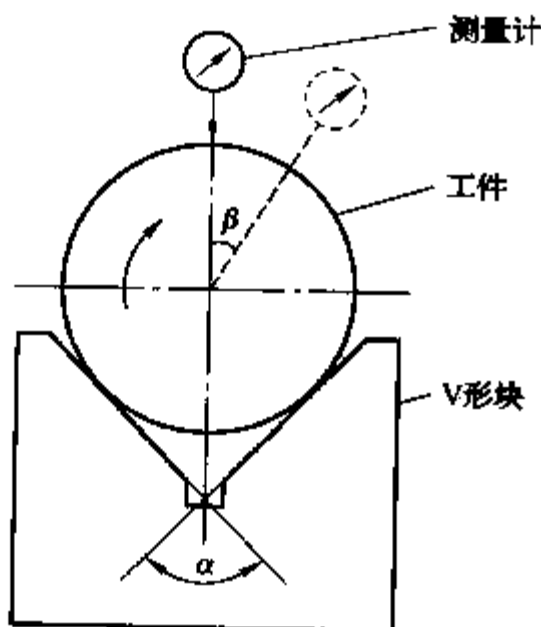


图 8-105 平直度、跳动检测示意图

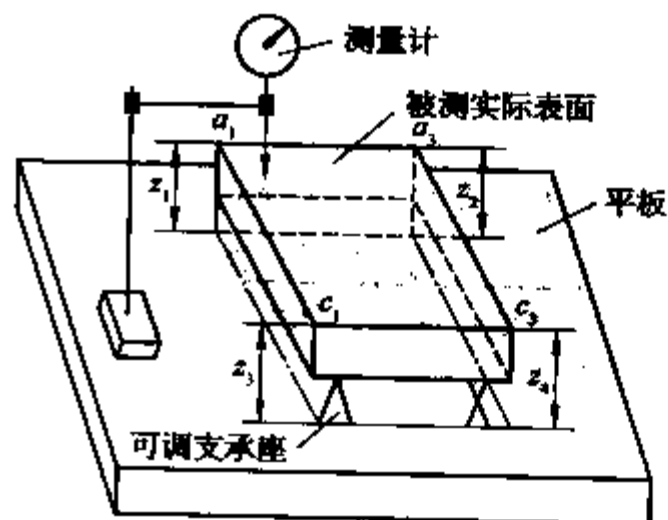
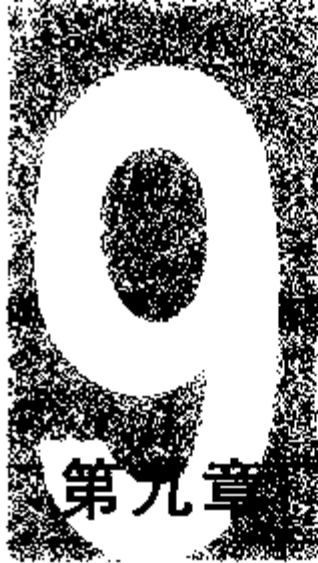


图 8-106 板状工件变形测量示意图

4) 其他各种畸变量的检测 根据具体工艺要求及配备条件，可用三坐标测量机、齿形测量仪等各种计量测试仪进行检测。



## 第九章

# 热处理通用设备

## 第一节 加热设备

### 一、电阻炉设备编号

以电阻体作为发热元件(加热器)的电炉,统称为电阻炉。按 GB10067.4—2005《电热装置基本技术条件 第4部分:间接电阻炉》,热处理电阻炉的分类和代号见表 9-1。

表 9-1 热处理电阻炉的分类代号

类别代号	类别名称	类别代号	类别名称
RB	罩式炉	RN	气体渗碳炉
RC	传送带式炉	RQ	井式气体渗碳炉
RD	电烘炉	RT	台车式炉
RF	强迫对流井式炉	RX	箱式炉
RG	滚筒炉	RY	电浴炉
RJ	自然对流井式炉	RZ	振底式炉
RK	坑式炉	RL	流态粒子炉
RM	箱式淬火炉(即多用炉)		

### 二、电阻炉的主要类型

#### (一) 箱式电阻炉

##### 1. 中温箱式电阻炉

中温箱式电阻炉采用金属电阻丝或电阻带作为发热元件,一般最高使用温度为 950℃。可用于碳钢、合金钢件的退火、正火、淬火、回火以及固体渗碳等常规热处理。其型号规格及技术数据见表 9-2。

表 9-2  $RX_3$ 型中温箱式电阻炉的型号规格及技术数据

型号	$RX_3-15-9$	$RX_3-30-9$	$RX_3-45-9$	$RX_3-60-9$	$RX_3-75-9$	$RX_3-150-9$
炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	600×300×250	950×450×350	1000×600×400	1500×750×450	1800×900×550	2400×1200×700
最大装载量(kg)	80	200	400	700	1200	1800

注:  $RX$ ——表示箱式电阻炉,第一位数字——序号,第二列数字——额定功率(kW),第三列数字 9 表示最高工作温度为 950℃,电压为 380 V。

##### 2. 高温箱式电阻炉

高温箱式电阻炉使用温度一般可达 1100℃以上,主要用于高速钢、高合金钢、高铬钢等工件的淬火加热,不锈钢、耐热合金的高温固溶处理,以及一般工件的退火和高温固体渗碳等。表 9-3 为采用金属电热元件的



高温箱式电阻炉的型号规格数据。表 9-4 为以钼丝为加热元件的高温箱式炉的型号规格及技术数据。表 9-5 为非金属电热元件高温箱式炉的型号规格及技术数据。

表 9-3 1 200℃ RX<sub>3</sub> 型箱式电阻炉的型号规格及技术数据

型 号	RX <sub>3</sub> -20-12	RX <sub>3</sub> -45-12	RX <sub>3</sub> -65-12	RX <sub>3</sub> -90-12	RX <sub>3</sub> -115-12
炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	650×300×250	950×450×350	1 200×600×400	1 500×750×450	1 800×900×550
最大装载量(kg)	50	100	200	400	600

注：除第三列数字 12 表示最高工作温度为 1 200℃，电压为 380 V 外，其余同表 9-2 注。

表 9-4 1 400℃ RX<sub>4</sub> 箱式电阻炉的型号规格及技术数据

型 号	RX <sub>4</sub> -14-14	RX <sub>4</sub> -25-14	RX <sub>4</sub> -30-14	RX <sub>4</sub> -37-14	RX <sub>4</sub> -50-14
炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	520×220×220	600×280×300	650×300×250	810×300×250	950×450×350
最大装载量(kg)	60	120	130	380	350

注：除第三列数字 14 表示最高工作温度为 1 400℃ 外，其余同表 9-2 注。

表 9-5 1 600℃ RX<sub>4</sub> 非金属电热元件箱式电阻炉型号及技术数据

型 号	RX <sub>4</sub> -20-16	RX <sub>4</sub> -40-16	RX <sub>4</sub> -60-16	RX <sub>4</sub> -80-16	RX <sub>4</sub> -100-16
炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	600×300×200	750×400×300	900×500×400	1 000×600×500	1 100×700×600
最大装载量(kg)	20	40	60	80	100

注：除第三列数字 16 表示最高工作温度为 1 600℃ 外，其余同表 9-2 注。

非金属电热元件高温箱式炉的特点是工作温度较高，电热元件成本低、使用寿命长，但非金属电热元件材质脆，受碰撞易折断，电阻温度系数会变化，需要在使用中调整输入电压，才能保证得到稳定的功率。

### 3. 少无氧化箱式电阻炉

少无氧化箱式电阻炉在结构上除了对炉口、炉壳采取密封措施外，还给炉膛配置炉罐及气源等装置，以达到在保护气氛下进行少无氧化加热。这类炉子可用于碳钢、合金钢等中小型工件的光亮退火、正火与淬火。炉子使用温度可达 1 000~1 300℃，见表 9-6、表 9-7。

表 9-6 1 000℃ RX<sub>5</sub> 少无氧化箱式电阻炉的型号规格及技术数据

型 号	RX <sub>5</sub> -15-10S	RX <sub>5</sub> -30-10S	RX <sub>5</sub> -45-10S	RX <sub>5</sub> -60-10S	RX <sub>5</sub> -75-10S
炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	650×300×250	950×450×350	1 200×600×400	1 500×750×450	1 800×900×550
最大装载量(kg)	50	100	200	400	600

注：除第三列数字 10 表示最高工作温度为 1 000℃，S 表示少无氧化外，其余同表 9-2 注。

表 9-7 1 200~1 300℃ 少无氧化箱式电阻炉的型号规格及技术数据

型 号	功率 (kW)	最高工作温度 (℃)	炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	最大装载量 (kg)	参考质量 (kg)
RX <sub>4</sub> -20-12S/RX <sub>3</sub> -30-13	20/30	1 200/1 300	650×300×250	50	1 400/1 830
RX <sub>4</sub> -45-12S/RX <sub>3</sub> -50-13	45/50	1 200/1 300	950×450×350	100	2 100/2 400

(续表)

型 号	功率 (kW)	最高工作温度 (°C)	炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	最大装载量 (kg)	参考质量 (kg)
RX <sub>4</sub> -65-12S/GY <sup>①</sup> 91-865	65/75	1 200/1 300	1 200×600×400	200	2 500/2 800
RX <sub>4</sub> -90-12S/GY91-866	90/100	1 200/1 300	1 500×750×450	400	4 100/4 300
RX <sub>4</sub> -115-12S/GY91-868	115/130	1 200/1 300	1 800×900×550	600	5 400/5 700

注: ① GY 系列为圆体型, S——少无氧化。

#### 4. 强迫对流箱式电阻炉

强迫对流箱式电阻炉就是设有风扇强制循环系统的箱式炉。这类炉子炉温均匀性较好,常用于热处理回火及铝合金、镁合金等有色金属的退火、正火等。表 9-8 是箱式回火炉的技术数据。表 9-9 为 1 000℃强迫对流箱式电阻炉的型号规格及数据。

表 9-8 GY96 型箱式回火炉技术数据(最高工作温度 700℃)

型 号	GY96-101S	GY96-102S	GY96-103S	GY96-104S	GY96-105S
炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	650×300×250	950×450×350	1 200×600×400	1 500×750×450	1 800×900×550
功率(kW)	12	25	40	55	70
最大装载量(kg)	100	300	500	500	800

注: GY 系列为圆体型, S——少无氧化。

表 9-9 1 000℃强迫对流箱式电阻炉型号规格及技术数据(最高工作温度 1 000℃)

型 号	RX <sub>10</sub> -30×65 ×25-GY	RX <sub>10</sub> -45×95 ×35-GY	RX <sub>10</sub> -60×120 ×40-GY	RX <sub>10</sub> -75×150 ×45-GY	RX <sub>10</sub> -90×180 ×55-GY
炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	650×300×250	950×450×350	1 200×600×400	1 500×750×450	1 800×900×550
功率(kW)	20	32	50	65	80
最大装载量(kg)	90	250	400	600	950

注: GY 系列为圆体型。

### (二) 井式电阻炉

井式电阻炉炉膛为圆井形,其特点是工件可垂直悬挂加热,适用于长杆件热处理,进出料能利用吊车,炉盖安装风扇后温度均匀性优于箱式炉;缺点是炉口与炉底处温度稍低,炉盖开启散热损失较大;其类型有低温、中温、高温井式炉三种。

#### 1. 低温井式电阻炉

低温井式电阻炉最高工作温度为 650℃,为使炉温均匀,一般在炉盖上装有风扇以强迫炉气循环流动。这类炉子主要用于热处理件的回火。图 9-1 是井式电阻炉手动杠杆式炉盖升降示意图。表 9-10 是该类炉子的型号规格及技术数据。

表 9-10 RJ<sub>3</sub>型低温井式电阻炉的型号规格及技术数据

型 号	RJ <sub>3</sub> -25-6	RJ <sub>3</sub> -35-6	RJ <sub>3</sub> -45-6	RJ <sub>3</sub> -55-6	RJ <sub>3</sub> -65-6	RJ <sub>3</sub> -75-6	RJ <sub>3</sub> -90-6
炉膛尺寸(mm) (直径×深度)	400×500	500×650	500×980	700×900	600×1 800	950×1 200	1 000×1 500
最大装载量(kg)	150	250	350	750	800	1 000	1 200

注: RJ——井式加热炉,第一位数字——序号,第二列数字——额定功率(kW),第三列数字 6——最高工作温度为 650℃。

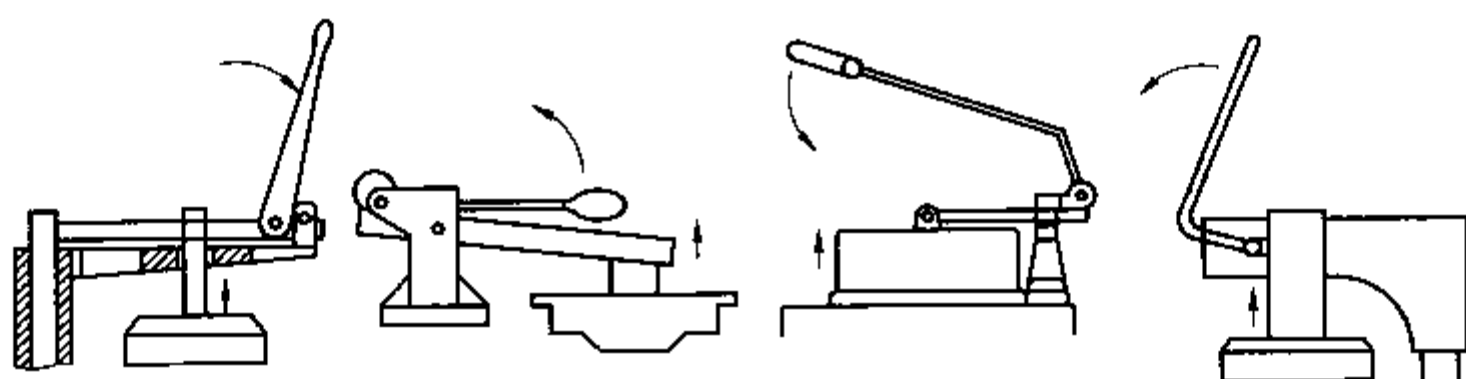


图 9-1 手动杠杆式炉盖升降机构

## 2. 中温井式电阻炉

中温井式电阻炉主要用于轴类等细长工件的退火、正火和淬火加热,及高速钢拉刀的淬火预热和回火等。表 9-11 为中温井式电阻炉的型号及主要参数。

表 9-11 RJ<sub>3</sub>型中温井式电阻炉的型号规格及主要参数

型 号	RJ <sub>3</sub> -40-9	RJ <sub>3</sub> -65-9	RJ <sub>3</sub> -75-9	RJ <sub>3</sub> -60-9	RJ <sub>3</sub> -95-9	RJ <sub>3</sub> -125-9	RJ <sub>3</sub> -90-9	RJ <sub>3</sub> -140-9	RJ <sub>3</sub> -190-9
炉膛尺寸(mm) (直径×深度)	600×800	600×1600	600×2400	800×1000	800×2000	800×3000	1000×1200	1000×2400	1000×3600
最大装载量(kg)	350	700	1100	800	1600	2400	1500	3000	4000

注:除第三列数字9表示最高工作温度为950℃外,其余同表9-10注。

## 3. 高温井式电阻炉

高温井式电阻炉主要用于大型圆柱形、圆筒形和杆轴状工件的正火、淬火与回火。炉子的加热元件有金属电热元件和非金属电热元件。表 9-12 是金属元件高温井式电阻炉的型号规格及主要参数。表 9-13 是非金属电热元件的高温井式电阻炉的型号规格及主要参数。

表 9-12 RJ<sub>3</sub>型金属电热元件高温井式电阻炉的型号规格及主要参数

型 号	RJ <sub>3</sub> -50-12	RJ <sub>3</sub> -75-12	RJ <sub>3</sub> -80-12	RJ <sub>3</sub> -110-12	RJ <sub>3</sub> -105-12	RJ <sub>3</sub> -140-12	RJ <sub>3</sub> -165-12
炉膛尺寸(mm) (直径×深度)	600×800	600×1600	800×1000	800×2000	1000×1200	1000×1500	1000×2400
最大装载量(kg)	350	750	800	1600	1500	2000	3000

注:除第三列数字12表示最高工作温度为1200℃外,其余同表9-10注。

表 9-13 RJ型非金属电热元件高温井式电阻炉的型号规格及主要参数

型 号	额定功率 (kW)	最高工作温度 (℃)	工作电压 (V)	炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	空载损耗 (kW)
RJ-25-13	25	1300	185~405	300×300×600	≤12
RJ-65-13	65	1300	115~175	300×300×1200	≤28
RJ-95-13	95	1300	115~175	300×300×2207	≤34

## 4. 强对流井式光亮退火炉

强对流井式光亮退火炉由一个加热炉和两个退火罐组成,当一个退火罐在加热时,另一个退火罐在冷却。密封罐用耐热钢焊接而成。罐盖与罐体采用水冷橡胶密封。罐盖上装有强制对流的大流量风机和保护气通入装置,罐体排气有泄压口。为加速排气,也可使用真空泵抽气。该设备主要用于卷板、卷带、卷丝等工件在保护气氛下进行光亮退火。表 9-14 为其型号规格及技术数据。

表 9-14 RJF8 型强对流井式光亮退火炉的型号规格及技术数据(最高工作温度 800℃)

型 号	RJF8-75×200-NS	RJF8-75×300-NS	RJF8-90×200-NS	RJF8-90×300-NS	RJF8-110×200-NS
功率(kW)	95	110	100	150	140
最大装载量(kg)	1 500	2 550	2 400	3 500	3 200
型 号	RJF8-110×300-NS	RJF8-125×200-NS	RJF8-125×300-NS	RJF8-140×200-NS	RJF8-140×300-NS
功率(kW)	200	180	220	200	250
最大装载量(kg)	5 500	4 800	7 000	6 000	8 500

注：型号中第二列数字分别表示炉膛直径(cm)×深度(cm)，NS——以氮气作保护气的少无氧化退火炉。

### 5. 预抽真空井式炉

预抽真空井式炉的炉罐采用密封结构并配置机械泵抽气系统和充保护气系统，加热前预抽真空，排除炉内空气，接着充入保护气，在保护气下加热和冷却，常用于小型工件、工模具的加热光亮淬火、回火和退火等。图 9-2 为预抽真空井式炉的结构示意图。表 9-15 是该类炉的型号规格及主要参数。

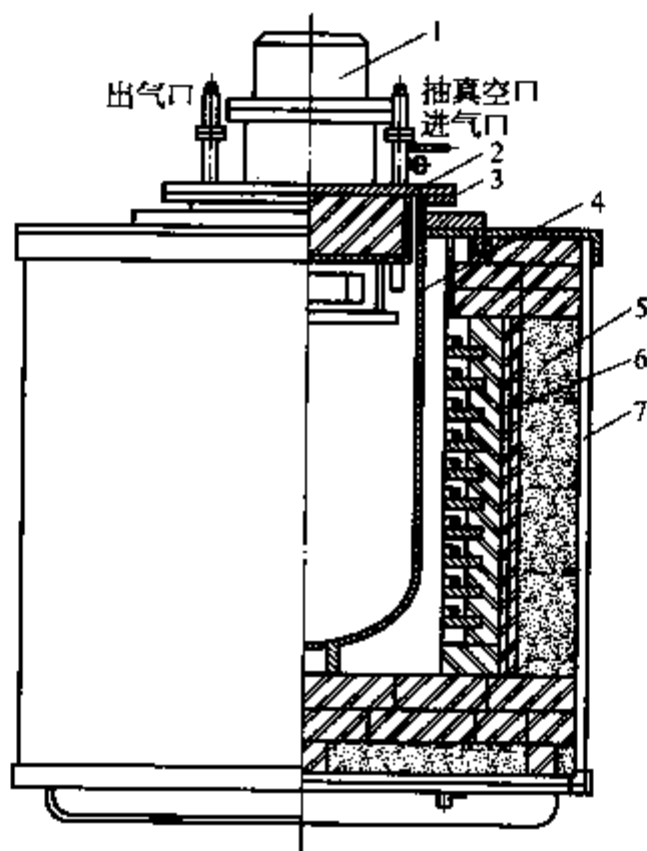


图 9-2 预抽真空井式电阻炉结构

1—风扇电动机；2—炉盖；3—密封圈；4—炉罐；  
5—炉衬；6—电热元件；7—炉壳

表 9-15 预抽真空井式炉的型号规格及主要参数(最高工作温度 1 000℃)

型 号	功率(kW)	最高工作温度(℃)	炉膛尺寸(mm)(直径×深度)	最大装炉量(kg)
CY86-217	25	750	400×600	200
CY86-222	60	750	600×700	250
CY86-219	60	750	500×1 000	500
CY86-224	75	750	500×1 500	700
CY86-203	90	950	600×1 050	1 200
CY86-230	82	750	600×1 500	650

(续表)

型号	功率(kW)	最高工作温度(℃)	炉膛尺寸(mm)(直径×深度)	最大装炉量(kg)
CY86-225	120	950	600×2 500	1 900
CY86-30	95	950	800×1 200	1 000
CY86-201	80/120	650/950	800×1 500	1 900
CY86-231	100	750	800×2 000	1 350
CY86-220	120	750	800×2 500	1 500
CY86-204	180	950	900×1 500	3 000
CY86-205	160/220	750/950	1 050×1 600	2 500
CY90-221	250	750	1 350×2 500	3 000
CY86-232	165	750	1 000×1 600	2 500
CY86-234	250	750	1 000×3 000	3 000
CY86-221	540	750	1 620×5 500	8 000

### (三) 台车式电阻炉

#### 1. 标准台车式电阻炉

台车式电阻炉主要用于钢铁零件,尤其是大型铸锻件和钢卷、钢棒等的正火、淬火、回火、退火等。表9-16是标准台车式电阻炉的型号规格及技术数据。表9-17是1 100℃台车式电阻炉的型号规格及技术数据。表9-18是1 200℃/1 300℃台车式电阻炉的型号规格及技术数据。

表9-16 RT<sub>3</sub>型标准台车式电阻炉的型号规格及技术数据

型号	RT <sub>3</sub> - 45-10	RT <sub>3</sub> - 65-10	RT <sub>3</sub> - 90-10	RT <sub>3</sub> - 105-10	RT <sub>3</sub> - 150-10	RT <sub>3</sub> - 180-10	RT <sub>3</sub> - 250-10	RT <sub>3</sub> - 320-10	RT <sub>3</sub> - 750-10
工作空间尺寸(mm) (长×宽×高)	950×450 ×350	1 300×650 ×550	1 800×900 ×600	1 800×900 ×650	2 000×1 000 ×700	2 400×1 200 ×750	2 400×1 500 ×800	3 500×1 500 ×1 000	3 000×6 000 ×1 600
最大装载量(kg)	750	1 000	2 500	2 500	4 000	5 000	9 000	12 000	50 000

注:RT—台车式电阻炉,第一列数字——序号,第二列数字——额定功率(kW),第三列数字10——最高工作温度为1 000℃。

表9-17 RT<sub>11</sub>型台车式电阻炉的型号规格及技术数据

型号	功率(kW)	工作空间尺寸(mm)(长×宽×高)	最大装炉量(kg)
RT <sub>11</sub> -80×120×60-NS	75	800×1 200×600	2 000
RT <sub>11</sub> -80×180×50-NS	105	800×1 800×500	2 100
RT <sub>11</sub> -90×160×65-NS	100	900×1 600×650	2 200
RT <sub>11</sub> -90×200×70-NS	185	900×2 000×700	4 200
RT <sub>11</sub> -90×250×60-NS	160	900×2 500×600	3 600
RT <sub>11</sub> -100×200×100-NS	190	1 000×2 000×1 000	4 200
RT <sub>11</sub> -100×250×70-NS	220	1 000×2 500×700	4 500
RT <sub>11</sub> -120×150×80-NS	120	1 200×2 400×800	35 000
RT <sub>11</sub> -120×240×80-NS	220	1 200×2 400×800	6 000
RT <sub>11</sub> -135×230×110-NS	260	1 350×2 300×1 100	10 000

表 9-18 1 200℃/1 300℃ GY 型台车式电阻炉的型号规格及技术数据

型 号	功率(kW)	最高工作温度(℃)	工作空间尺寸(mm)(长×宽×高)	最大装炉量(kg)
GY90-684	55/60	1 200/1 300	950×450×350	750
GY90-685	80/90	1 200/1 300	1 300×650×450	1 000
GY90-686	120/140	1 200/1 300	1 800×900×600	2 500
GY01-39 <sup>①</sup>	175	1 200	2 000×1 000×750	4 000
GY90-687	200/230	1 200/1 300	2 400×1 200×750	5 000
GY90-688	270/290	1 200/1 300	2 400×1 500×800	9 000
GY90-689	350/380	1 200/1 300	3 500×1 500×1 000	12 000

注: ① GY01-39 为2001年设计的型号。

### 2. 全纤维台车式电阻炉

全纤维台车式电阻炉采用全纤维结构,蓄热量少、密封性好、升温快,节能显著是该炉的特点。表 9-19 为全纤维台车式电阻炉的型号规格及技术数据。

表 9-19 全纤维台车式电阻炉的型号规格及技术数据

型 号	功率(kW)	最高工作温度(℃)	工作空间尺寸(mm)(长×宽×高)	最大装炉量(kg)
RT <sub>3</sub> -480-9	480	950	4 500×2 600×1 500	15 000
RT <sub>3</sub> -620-9	620	950	7 000×2 600×1 500	18 000
GY-88-23	45	950	1 200×600×400	8 000
GY-88-22	75	950	1 800×900×550	1 500
GY-85-61	600	950	5 700×2 600×1 500	18 000
GY-98-36	350	950	3 300×2 100×1 300	14 000
GY-99-111	110	1 100	1 100×900×1 000	3 000

### 3. 双门双台车式电阻炉

双门双台车式电阻炉,设有双向炉门,双边台车,可双向装卸工件,炉体与台车能自动密封,是适应工艺范围更广的台车式炉。表 9-20 为其型号规格及技术数据。

表 9-20 GY 型双门双台车式电阻炉的型号规格及技术数据

型 号	功率(kW)	最高工作温度(℃)	工作空间尺寸(mm)(长×宽×高)	最大装炉量(kg)
GY96-171	150+50	950	1 000×2 000×700	4 000
GY96-172	220+72	950	1 000×3 000×700	6 000
GY96-173	180+60	950	1 200×2 400×800	5 000
GY96-174	260+85	950	1 200×3 600×800	7 500
GY91-120	350+125	1 000	1 500×4 000×950	12 000
GY91-681	120+40	1 100	3 200×6 500×500	25 000
GY96-174	300+100	950	1 200×3 600×800	7 500

## (四) 井式渗碳炉

### 1. 标准型井式渗碳炉

井式渗碳炉主要用于渗碳、渗氮、碳氮共渗等周期作业。表 9-21 是该类炉的型号规格及技术数据。

表 9-21 RQ<sub>3</sub>型井式气体渗碳炉的型号规格及技术数据

型 号	RQ <sub>3</sub> -25-9	RQ <sub>3</sub> -35-9	RQ <sub>3</sub> -60-9	RQ <sub>3</sub> -75-9	RQ <sub>3</sub> -90-9	RQ <sub>3</sub> -105-9
炉膛尺寸(mm) (直径×深度)	300×450	300×600	450×600	450×900	600×900	600×1200
最大装载量(kg)	50	70	150	220	400	500

注: RQ——气体渗碳电阻炉, 第一列数字——序号, 第二列数字——额定功率(kW), 第三列数字 9——最高工作温度为 950℃。

### 2. 脉冲式真空渗碳炉

脉冲式真空渗碳炉, 采用正压、负压、正负压等多种脉冲工艺, 配备真空泵和脉冲控制装置, 可定时定压调控, 渗速快, 渗层质量高, 即使带深孔、小孔、盲孔、狭缝的零件也能获得内壁渗层均匀的效果。表 9-22 是脉冲式真空渗碳炉的型号规格及主要参数。

表 9-22 RQ<sub>5</sub>型脉冲式真空渗碳炉的型号规格及主要参数

型 号	RQ <sub>5</sub> -10 -10DM	RQ <sub>5</sub> -15 -10DM	RQ <sub>5</sub> -20 -90DM	RQ <sub>5</sub> -25 -90DM	RQ <sub>5</sub> -35 -90DM	RQ <sub>5</sub> -60 -90DM	RQ <sub>5</sub> -75 -90DM	RQ <sub>5</sub> -90 -90DM	RQ <sub>5</sub> -105 -90DM
料筐尺寸(mm) (直径×高度)	200×300	200×400	250×400	300×450	300×600	450×600	450×900	600×900	600×1200
最大装载量(kg)	20	30	40	50	100	150	220	400	500

注: RQ——气体渗碳电阻炉, 第一列数字——序号, 第二列数字——额定功率(kW), 第三列数字 10DM——最高工作温度为 1050℃, 90DM——最高工作温度有 950℃及 1050℃。

### 3. 大型井式渗碳炉

大型井式渗碳炉, 主要用于长轴类工件和大型齿轮类工件的渗碳处理。其结构特点是, 炉内加热器分多区控制, 炉膛大而深。炉罐上端与炉盖采用橡胶水冷密封, 下端与炉底采用油封水冷系统。为促进炉温均匀, 除在炉盖上装备大流量循环风机外还在炉罐内设导风筒, 以加强气流循环运动。炉盖的开启一般为液压升降式或机械行走式。图 9-3 为该类炉子的结构示意图。表 9-23 是大型井式渗碳炉的型号规格及主要参数。

大型井式渗碳炉的渗碳气氛可选择多种气源和渗碳剂。气氛的测量、调节系统由氧探头和智能碳控仪组成。炉温控制采用智能温度程序控制仪和可控硅模块组合的 PID 调节, 且温度和碳控仪之间可相互响应, 还能和工业 PC 机组成集散控制系统。

表 9-23 RQ<sub>9</sub>型大型井式渗碳炉的型号规格及主要参数

型 号	RQ <sub>9</sub> -90×500-NS	RQ <sub>9</sub> -100×400-NS	RQ <sub>9</sub> -100×800-NS	RQ <sub>9</sub> -120×120-NS	RQ <sub>9</sub> -140×120-NS
功率(kW)	36	300	450	130	180
最大装载量(kg)	5000	4500	9000	2000	3000
型 号	RQ <sub>9</sub> -150×200-NS	RQ <sub>9</sub> -160×160-NS	RQ <sub>9</sub> -180×180-NS	RQ <sub>9</sub> -220×110-NS	RQ <sub>9</sub> -220×220-NS
功率(kW)	220	200	300	320	420
最大装载量(kg)	5000	5000	7000	6000	13000
型 号	RQ <sub>9</sub> -230×200-NS	RQ <sub>9</sub> -240×180-NS	RQ <sub>9</sub> -250×250-NS	RQ <sub>9</sub> -300×250-NS	RQ <sub>9</sub> -350×250-NS
功率(kW)	260	250	580	650	850
最大装载量(kg)	12000	12000	18000	25000	30000

注: 型号中第二列数字分别表示工作区的直径(cm)×深度(cm)。

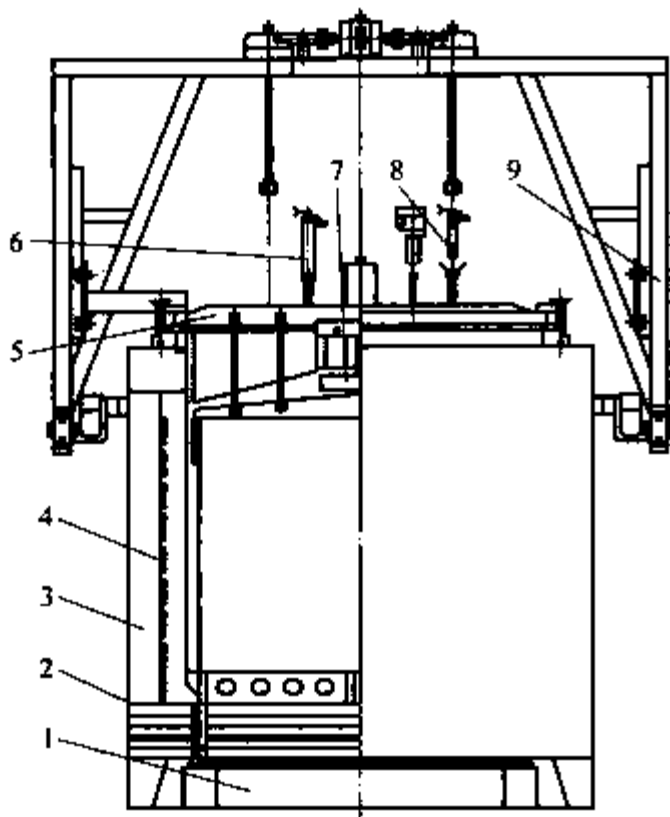


图 9-3 大型井式渗碳炉

1—炉底；2—炉壳；3—炉衬；4—导风筒；5—炉盖；  
6—排气管；7—风扇；8—滴液管；9—炉盖开启装置

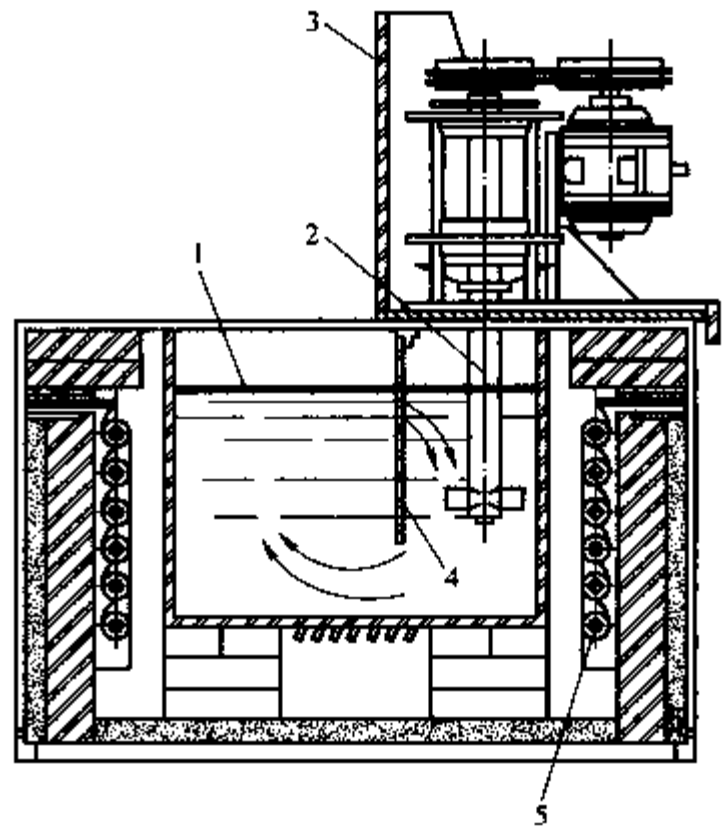


图 9-4 带搅拌器的外部电热式硝盐炉

1—盐液面；2—搅拌器；3—挡板；4—隔离板；5—电热元件

### (五) 盐浴炉

盐浴炉是以熔盐作为加热介质的电阻炉。按加热方式不同,可分为外热式和内热式。而内热式又有电极式及管状加热元件两种,其中以电极盐浴炉应用最为普遍。外热式按热源不同可分为电阻加热式和燃料加热式,而又以外热式电阻盐浴炉使用较多。盐浴炉如以温度划分,则可分为低温、中温、高温盐浴炉。低温炉一般使用温度范围为  $160\sim 550^{\circ}\text{C}$ ,中高温盐浴炉用于  $600\sim 1\,300^{\circ}\text{C}$  范围内的工件加热和化学热处理。

#### 1. 外热式盐浴炉

(1) 外热式电阻低温盐浴炉,其结构如图 9-4 所示。外热式低温盐浴炉使用硝盐作为加热介质,使用温度限制在  $550^{\circ}\text{C}$  以下,常用于马氏体分级淬火、贝氏体等温淬火、回火及变形铝合金热处理。表 9-24 是其型号规格及技术数据。

表 9-24 GY 型外热式电加热低温盐浴炉的型号规格及技术数据

型 号	GY84-91	GY84-92	GY96-51	GY84-94	GY84-95	GY84-96
炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	450×400×530	400×360×700	500×450×850	600×500×1 050	700×500×1 120	900×500×1 100
额定功率(kW)	15	25	35	40	50	60
最大装载量(kg)	140	160	290	490	610	760

注:最高工作温度为  $550^{\circ}\text{C}$ ,介质硝盐。

(2) 外热式电阻中温盐浴炉。外热式电阻中温盐浴炉使用的加热介质一般为氯化盐的混合盐,最高工作温度可达  $850^{\circ}\text{C}$ ,主要用于预热、分级,中温热处理及化学热处理。由于使用温度较高,金属坩埚一般用耐热钢浇注而成或用耐热钢板焊接而成。焊接坩埚的壁厚不应小于  $10\text{ mm}$ ,铸造的坩埚壁厚一般为  $10\sim 25\text{ mm}$ 。炉衬与炉体结构与井式电阻炉相似。炉体上部安装通风排气口,炉膛的底部设置排液口,当浴槽泄漏时可排出盐液。表 9-25 是外热式电阻中温盐浴炉的型号规格及技术数据。



表 9-25 CY2 型外热式电阻中温盐浴炉的型号规格及技术数据

型 号	CY2-10-8	CY2-20-8	CY2-30-8
炉膛尺寸(mm)(直径×深度)	200×350	300×550	400×575
功率(kW)	10	20	30
最大装炉量(kg)	30	80	100

### 2. 管状加热元件内热式盐浴炉

管状加热元件内热式盐浴炉,作为低温炉,最高使用温度一般不高于 550℃,介质多为硝盐,主要用于钢件的回火、分级淬火和等温热处理。表 9-26 是在使用介质中允许的最高表面负荷率。表 9-27 为电热元件金属管常用材料在常用介质中允许的最高温度。表 9-28 为管状加热元件内热式低温盐浴炉的技术数据。

表 9-26 电热元件金属管材料在使用介质中允许的最高表面负荷率

加 热 介 质	煮沸的水、弱酸、弱碱溶液				最高温度为 550℃ 的硝盐和亚硝酸混合盐,硝酸等	
	铝 1070A~1035	铜 T4	碳钢 10	不锈钢 0Cr18Ni11	不锈钢 0Cr18Ni11	镍基合金 Incoloy800
金属管材料及其牌号	铝 1070A~1035	铜 T4	碳钢 10	不锈钢 0Cr18Ni11	不锈钢 0Cr18Ni11	镍基合金 Incoloy800
表面负荷(W/cm <sup>2</sup> )	5	7	9	11	9	9

表 9-27 电热元件金属管常用材料及其允许的最高温度

材 料	铜 T4	铝 1070A~1035	碳钢 10	12Cr18Ni9(1Cr18Ni9)	镍基合金
允许的最高温度(℃)	170	200	400	600	850

注:合金成分的质量分数(%)为: C0.04, Cr20.5, Ni32.00, Cu0.3, Mn0.75, Si0.36。

表 9-28 CY90 型管状加热元件内热式低温盐浴炉的型号规格及技术数据

型 号	CY90-901	CY90-902	CY90-903	CY90-904	CY90-905	CY90-906
炉膛尺寸(mm) (长×宽×高)	500×600 ×800	800×500 ×1000	800×650 ×1000	1000×800 ×1200	1000×1000 ×1500	1200×1200 ×1600
额定功率(kW)	35	55	70	85	100	120
最大装载量(kg)	35	500	900	1200	1500	1800

注:最高工作温度为 550℃,介质硝盐。

### 3. 电极式盐浴炉

电极式盐浴炉是电极布置在盐浴炉膛内部,依靠电极通入低电压大电流,将熔盐作为电阻发热介质,使电能转化为热能达到盐浴升温加热功能的盐浴炉。

电极式盐浴炉由耐火材料坩埚或金属坩埚、电极、炉体(由保温材料及金属外壳组成),连接铜排、变压器和电气控制柜组成。

电极式盐浴炉的特点是电极导电时产生的电磁效应搅拌熔盐,产生循环运动,提高了炉温均匀性,见图 9-5。

电极加热盐浴炉因电极布置的方式不同分为插入式电极盐浴炉与埋入式电极盐浴炉。

1) 插入式电极盐浴炉 插入式电极盐浴炉就是电极从上面直接插入浴槽的盐浴炉。

(1) 电极的布置方式、数量及浴槽的形式。插入式电极盐浴炉有多种电极布置方式和数量不一的电极配置,其坩埚截面形状也形式多样,见图 9-6,图中的(1)、(5)和(14)、(20)应用最广。

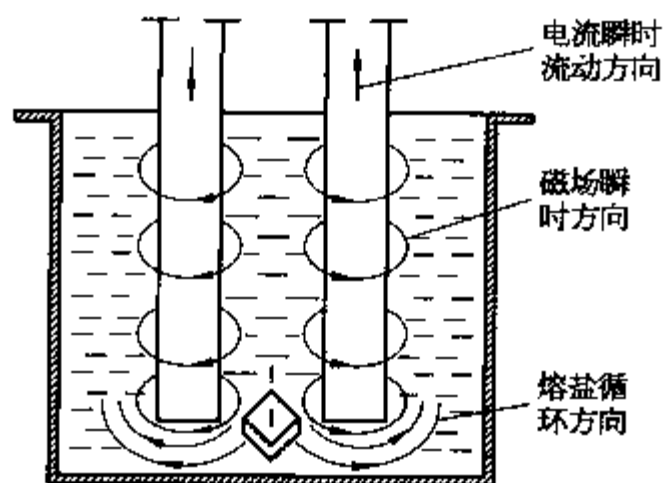


图 9-5 电极盐浴炉中的电磁循环或电磁搅拌作用

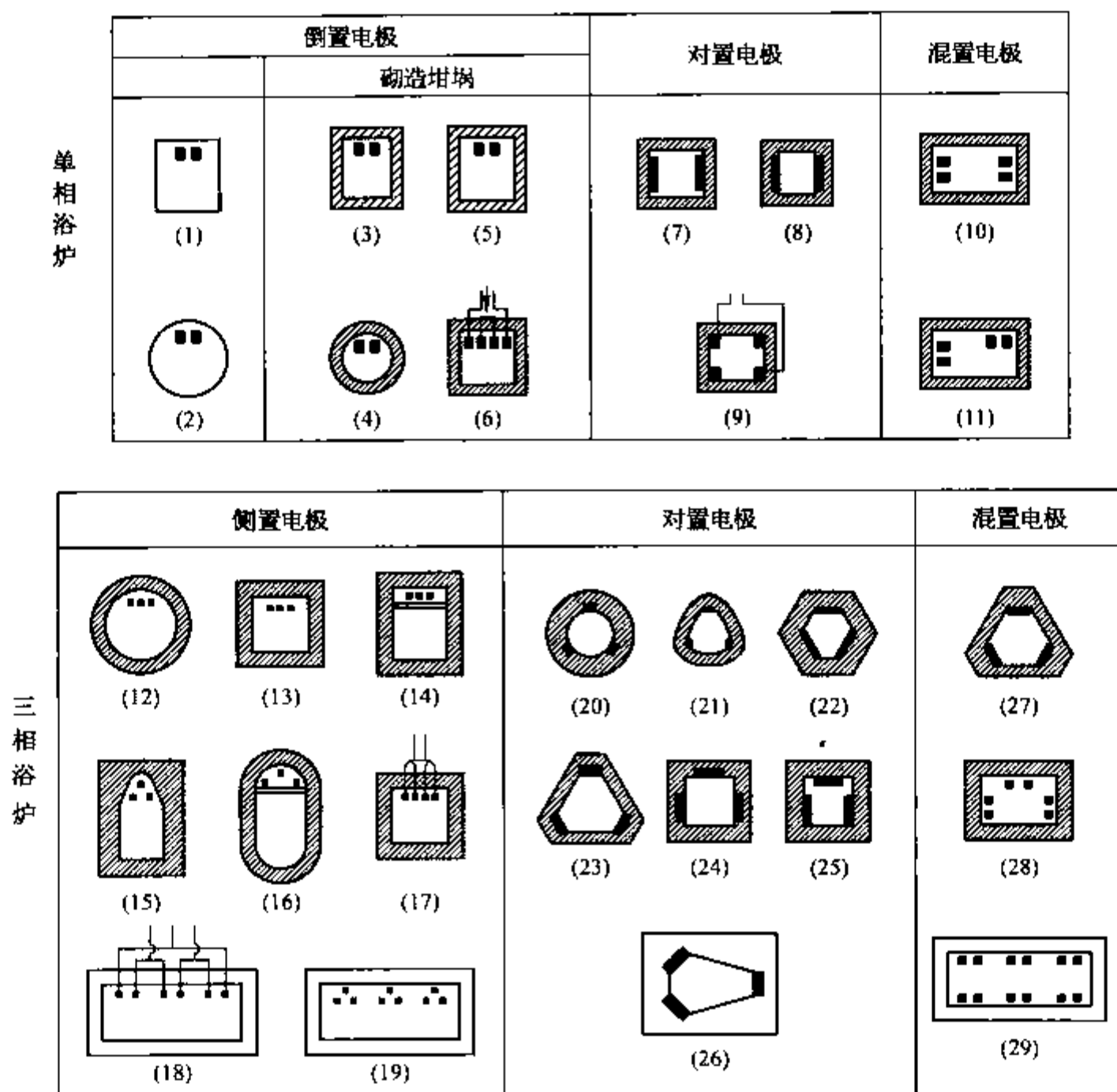


图 9-6 插入式浴炉的坩埚截面形状及电极布置方式

(2) 浴槽。插入式电极盐浴炉有金属浴槽和耐火材料浴槽两种。

① 金属浴槽。金属浴槽主要用于低温盐浴炉，工作温度  $150\sim 540^{\circ}\text{C}$ ，用作回火和分级、等温淬火。另外有工作温度  $650\sim 950^{\circ}\text{C}$  的盐浴炉，可用作液体渗碳。

② 耐火材料浴槽。一般多用于中、高温盐浴炉。浴槽常用重质黏土砖、高铝砖和异型耐火砖砌筑或用耐火混凝土捣打成型。耐火材料浴槽耐温高、使用寿命长，但砌筑的浴槽易从砖缝处渗盐，增加了熔盐的损耗。

(3) 电极。插入式电极盐浴炉的电极形状一般为圆形、方形或长方形和板形，制造比较简单。电极的材料有工业纯铁、低碳钢、不锈钢、耐热钢、耐热合金、石墨和碳化硅等。实际生产中，多数采用低碳钢，只有硝盐炉，因有腐蚀作用才采用不锈钢电极。表 9-29 是插入式电极盐浴炉的功率与电极横截面积关系的经验数据。表 9-30 是电极表面电流密度与盐浴温度的关系。

表 9-29 插入式电极盐浴炉功率与电极横截面积关系

浴炉功率(kW)	20	25	30	50	35	60	75	100
相 数	1	1	1	1	3	3	3	3
电极数量	2	2	2	2	3	3	3	3
电极截面边长或直径(mm)	45	50	55	75	45	60	80	80~100

表 9-30 电极表面电流密度与盐浴温度关系

温度(°C)	400	600	800	1 000	1 200	1 300
电流密度(A/cm <sup>2</sup> )	8.4	12.4	17.2	23.6	32.4	40

(4) 插入式电极盐浴炉的型号与规格见表 9-31。

表 9-31 RYD 型插入式电极盐浴炉的型号规格及技术数据

型号	RYD-20-13	RYD-25-8	RYD-35-13	RYD-45-13	RYD-50-6	RYD-75-13	RYD-100-8
坩埚尺寸(mm) (长×宽×高)	245×180×430	343×472	200×200×430	240×260×600	920×600×450	390×350×600	920×600×540
相数	1	1	3	1	3	3	3
额定生产率(kg/h)	90	90	100	200	100	250	160

注: RYD——电极盐浴炉,第二列数字——额定功率(kW),第三列数字——最高工作温度 13 表示 1 300°C,8 表示 850°C,6 表示 600°C。

2) 埋入式电极盐浴炉 埋入式电极盐浴炉是一种将电极预埋在耐火混凝土盐槽中,或将电极安装在预留的埋入部位的内热式电极盐浴炉。其优点是可提高坩埚容积利用率,延长电极寿命及节约电能。埋入式电极盐浴炉有顶埋式和侧埋式两类。侧埋式又因电极在坩埚中所处的方向不同分为平置电极式和垂直电极式。图 9-7 是埋入式盐浴炉的结构示意图。

(1) 浴槽尺寸的确定。浴槽尺寸可根据生产率、被加工件质量、体积、数量及工艺规范来确定。

① 可以参考图 9-8 所示的经验数据来确定。图中各符号所代表的意义和数值如下:

$a$ ——工件上端离熔盐表面的距离,一般为 50~80 mm。

$b$ ——工件或料筐离浴槽内壁的距离,约为 50 mm。

$c$ ——电极与浴槽底部的距离,一般为 50~70 mm。

$d$ ——熔盐表面与浴槽口的距离,约 50~100 mm。

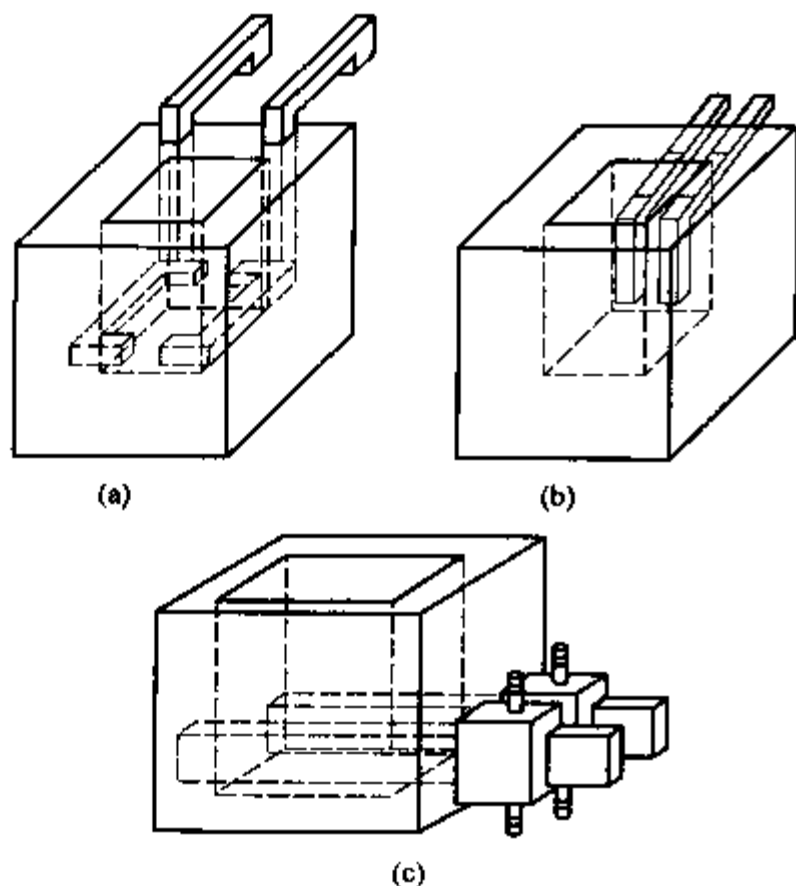


图 9-7 埋入式浴炉的结构

(a) 顶埋式; (b) 侧埋垂直式; (c) 侧埋平置式

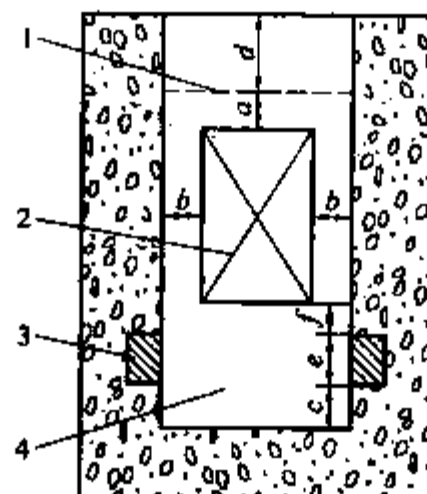


图 9-8 埋入式浴炉的尺寸

1—盐面; 2—工件或料筐; 3—电极; 4—浴槽

$e$ ——电极的高度应根据盐浴炉的功率来确定,一般为 80~235 mm。

$f$ ——工件或料筐下端与电极上端的距离,约为 50 mm。

② 可根据盐浴炉每小时生产率来确定:中温盐浴炉(650~950℃), $G=(3\sim 2)\times g$ ;高温盐浴炉(950~1300℃), $G=(1\sim 1.5)\times g$ 。其中, $G$ 为熔盐质量(kg); $g$ 为盐浴炉生产率(kg/h)。

③ 按被加工件体积确定:经验数据为, $V_{\text{浴槽}}=V_{\text{工件}}\times(20\sim 30)$ 。其中, $V_{\text{浴槽}}$ 为浴槽的体积; $V_{\text{工件}}$ 为被加工件的最大体积。总的原则是浴槽的容积设计在满足生产的同时要留有余地,适当加大,以减少炉温波动及提高工件的加热均匀度。

### (2) 埋入式电极盐浴炉的电极形式和布置方式

埋入式电极盐浴炉因功率大小及供电方式(单相或三相)的不同其电极形式和布置各不相同,其电极结构和布置见图 9-9。

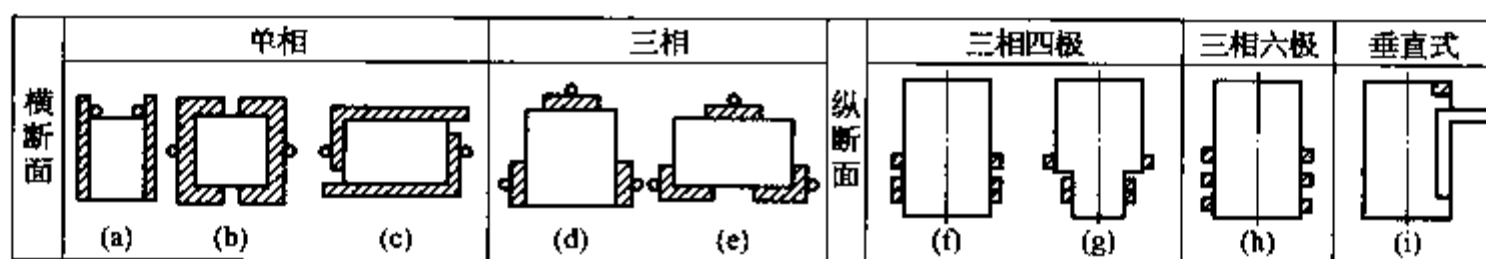


图 9-9 埋入式盐浴炉电极结构与布置形式

(a) 直条形; (b) 马蹄形; (c) 角形; (d) 块形; (e) 带角形块状;  
(f)、(g) 三相四极; (h) 三相六极; (i) 垂直式

(3) 埋入式电极尺寸的确定(经验数据确定法),见表 9-32。

表 9-32 电极尺寸的经验数据

浴炉功率(kW)	最高工作温度(℃)	炉膛尺寸(mm) (长×宽×深)	电极形式	电极尺寸(mm) (长×宽×高)	电极柄(mm) (长×宽)
20	850	200×200×600	直条形	200×113×50	113×50
25	1300	200×200×600	直条形	200×113×50	113×50
30	850	300×250×700	三相块形	两侧 125×80×65 中间 100×80×65	80×20
45	1300	350×300×700	直条形	140×113×65	113×50
30	650	350×300×700	三相块形	两侧 190×113×65 中间 170×113×65	80×20
45	850	350×300×700	三相块形	两侧 206×113×65 中间 146×113×65	113×20
70	1300	350×300×700	三相块形	两侧 225×113×65 中间 170×113×65	113×30
70	850	450×350×700	直条形	220×130×65	113×30
90	1300	450×350×700	三相块形	两侧 230×180×65 中间 230×180×65	113×30
90	650	450×900×700	三相角形块状	两端部 391×113×65 两侧面 450×113×65 中间 430×113×65	113×30
130	850	450×900×700	三相角形块状	两端部 391×113×65 两侧面 335×113×65 中间 430×113×65	113×36

(4) 埋入式电极盐浴炉的功率确定(经验数据法):

$$P = K \cdot V$$

式中  $P$ ——浴炉所需功率(kW);

$K$ ——浴炉的单位容积功率(经验数据)(kW/L),见表 9-33;

$V$ ——浴炉的熔盐体积(L)。

表 9-33 浴炉的单位容积功率

熔盐体积(L)	K(kW/L)		
	盐 炉 使 用 温 度 范 围		
	150~650℃	650~950℃	950~1300℃
<10	0.6~0.8	1.0~1.2	1.6~2.0
10~20	0.5~0.6	0.8~1.0	1.4~1.6
20~30	0.4~0.5	0.6~0.8	1.2~1.4
30~50	0.35~0.4	0.5~0.6	1.0~1.2
50~70	0.3~0.35	0.4~0.5	0.9~1.0
70~100	0.2~0.3	0.35~0.4	0.7~0.9
100~150	0.17~0.2	0.25~0.35	0.6~0.7
150~300	0.14~0.17	0.2~0.25	0.5~0.6
300~500	0.1~0.14	0.14~0.2	0.4~0.5
500~1000	0.08~0.1	0.12~0.14	0.3~0.4
1000~1500	0.06~0.08	0.1~0.12	—
1500~2000	0.03~0.06	0.08~0.1	—

(5) 埋入式电极盐浴炉的型号规格及参数。

① 单相埋入式电极盐浴炉的型号规格及参数见表 9-34。

② 三相埋入式电极盐浴炉的型号规格及参数见表 9-35。

表 9-34 RDM 型单相埋入式电极盐浴炉的型号规格及参数

型号规格	变压器容量(kVA)	电极电压(V)	生产率(kg/h)	电极截面(mm)	坩埚尺寸(mm)(长×宽×深)
RDM-20-13	25	6.9~20	90	50×50	180×180×430
RDM-25-8	30	6.9~20	90	50×50	300×300×490
RDM-45-13	50	6.95~9.65	200	φ75	260×240×600

注:第三列数字表示最高温度:13——1300℃,8——850℃,电源电压均为 380 V。

表 9-35 RDM 型三相埋入式电极盐浴炉的型号规格及参数

项 目	型 号									
	RDM-35~6	RDM-75~6	RDM-100~6	RDM-35~8	RDM-75~8	RDM-100~8	RDM-35~13	RDM-75~13	RDM-90~13	RDM-100~13
盐槽尺寸 长×宽×深 (mm×mm×mm)	350× 300×600	550× 400×665	800× 400×665	300× 250×665	450× 350×665	550× 400×665	200× 200×500	350× 300×500	450× 300×550	450× 350×565

注:型号中第二列数字表示额定功率(kW),第三列数字表示最高温度:13——1300℃,8——850℃,6——650℃,电源电压均为 380 V。

#### 4. 盐浴炉变压器

盐浴炉变压器提供盐浴低电压大电流。输出电压一般为 5~40 V, 输出电流几千安培。常用盐浴炉变压器有以下几种:

(1) 空冷变压器。优点: 冷却效果好, 绝缘可靠, 可过载运行, 超负荷达额定容量的 40% (在 1.5 h 内); 缺点是使用时需断电调档, 影响控温精度。

(2) 双水内冷式盐浴变压器。绕组铜管通水冷却不易发热, 功率输出稳定。但消耗冷却水, 且水易结垢堵塞铜管, 还不能断水使用, 水压 0.1~0.2 MPa, 进水水温  $\leq 30^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 油浸式带电抗器的盐浴变压器。该变压器采用内部的浸油来冷却绕组, 且带电抗器, 可带电调档, 分 13 级调节, 有利于炉温控制, 但调档的触头易接触不良而烧毛。

(4) 磁性调压器。磁性调压器可通过无级调节励磁线圈的电流来改变变压器铁心的磁导率及一次侧线圈的感应电抗, 从而达到控制盐浴炉的输入电流、调整炉温并实施自动控制的效果。磁性调压器有油浸式和干式两种。

### (六) 流态粒子炉

#### 1. 流态粒子炉结构

它是一种利用处于流态化的固体粒子作加热介质的热处理炉。由炉体、炉罐、粒子、布风板、供电系统、除尘回收装置及加热与控温系统组成, 如图 9-10 所示。炉罐通常用耐火材料制造。布风板安装在炉子底部, 可用金属材料或高铝耐热透气材料制造。炉气可用空气、氮气或氨基气氛、可燃性气体或其他气体, 可根据工艺及炉型种类选择。加热方式有外热式、内热式与燃烧式, 当供气系统将气体通过布风板送入炉膛, 使炉内固态粒子形成流态床, 被加热升温的流态床就可进行热处理。

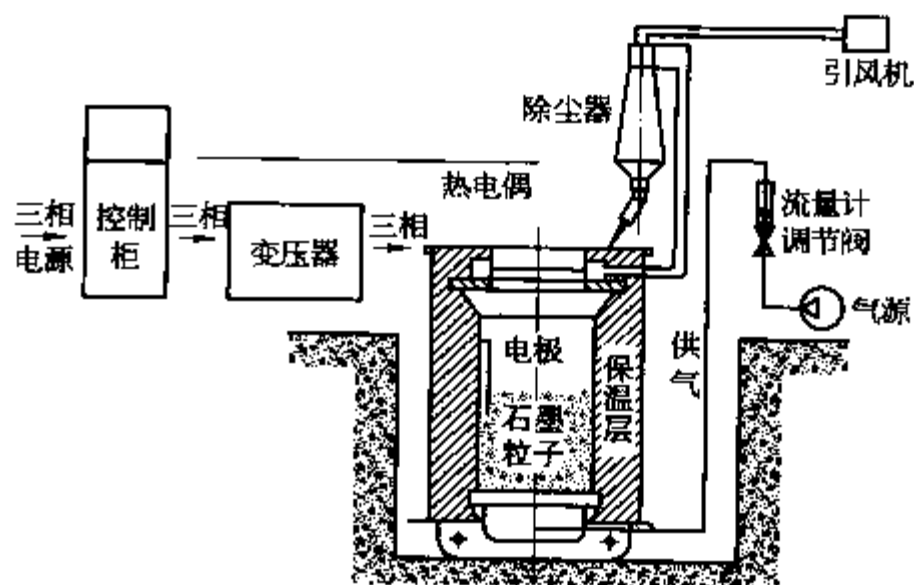


图 9-10 流态粒子炉的结构示意图

#### 2. 流态化粒子

固体粒子在流态化气体下形成流态化床, 并作为传热导电的加热介质, 为有利于流态化, 其粒度一般小于 1 mm。常用的流态化粒子种类和特性见表 9-36。

表 9-36 常用流态化粒子种类和特性

粒子材料	堆积密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	特性
石墨	0.76	800 $^{\circ}\text{C}$ 以下弱氧化性, 800~1 000 $^{\circ}\text{C}$ 中性, 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 以上呈还原性
$\text{Al}_2\text{O}_3$ (88%~98%)	2.08~2.23	粒度 0.3~0.8 mm, 呈中性, 不适用于 150 $^{\circ}\text{C}$ , 800 $^{\circ}\text{C}$ 以上流态化相当于盐浴升温能力
人造刚玉砂 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (62%~77%)	1.85~2.06 空心 0.35~0.71	不适用于 150 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 含 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 量增加, 流态化能力提高
$\text{ZrO}_2$ (66.39%) $\text{SiO}_2$ (33.1%)	3.2	50 $^{\circ}\text{C}$ 时就可流态化, 150 $^{\circ}\text{C}$ 以上可稳定流态化。ZrO <sub>2</sub> 热导率为 SiO <sub>2</sub> 的 2 倍
$\text{Cr}_2\text{O}_3$ (45.3%) $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (25.1%) $\text{Al}_2\text{O}_3$ (14.7%)	2.82	耐热性好, 呈中性, 不适于 150 $^{\circ}\text{C}$ 以下使用
$\text{SiO}_2$ (39.1%) $\text{MgO}$ (37.9%)	1.65	呈中性, 有时可用于 150 $^{\circ}\text{C}$ 以下, 作冷却介质用

## 3. 流态粒子炉的型号规格及技术数据

1) TH-01A 系列流态化粒子炉 该炉为石墨粒子介质的内热式流态粒子炉,其型号规格及技术参数见表 9-37。

表 9-37 TH-01A 系列流态化粒子炉的型号规格及技术参数

型 号	TH-01A-35	TH-01A-35	TH-01A-60	TH-01A-60	TH-01A-85	TH-01A-105	TH-01A-125	TH-01A-160	TH-01A-200
工作区尺寸(mm) (直径×高度)	320×500	350×500	350×700	450×500	450×700	450×900	450×1050	320×1450	320×1700
炉温均匀性(°C)	±3	±3	±3	±3	±3	±3	±3	±4	±5
最大功率(kW)	66	66	100	100	126	144	180	240	280
最大装载量(kg)	80	80	100	100	170	200	270	330	400

注:型号中第二列数字表示升温平均功率(kW),工作温度均为 950~1050°C,电源电压均为 3 相 380 V。

2) TH-02 系列流态粒子炉 TH-02 系列流态粒子炉型号规格及技术参数见表 9-38。该系列炉子是以 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粒子或石墨粒子为介质的外热式或内、外双热式流态粒子炉,主要用于化学热处理与表面处理。

表 9-38 TH-02 系列流态粒子炉的型号规格及技术参数

型 号	TH-02-08	TH-02-20	TH-02-35	TH-02-50	TH-02-70	TH-02-95
工作区尺寸(mm) (直径×高)	180×300	300×400	350×500	450×600	450×600	500×1000
工作温度(°C)	950~1050	950~1050	950~1050	950~1050	950~1050	950~1050
空载升温时间(h)	1~1.5	1~1.5	1.2~1.8	1.2~1.8	1.5~2	1.5~2
最大装载量(kg)	20	50	85	140	170	270

注:型号中第二列数字表示升温平均功率(kW),炉温均匀性均为±3°C,电源电压均为 3 相 380 V。

3) RL 系列外热式流态粒子炉 RL 系列外热式流态粒子炉的型号规格及技术参数见表 9-39。该系列的外热式流态化粒子炉的炉衬采用轻质高铝材料制成,电炉的加热器采用硅碳棒加热元件,炉罐为刚玉马弗筒,能满足 1300°C 的长期使用。

表 9-39 RL 系列外热式流态粒子炉的型号规格及技术参数

规格及型号	RL13-25×50-NS	RL13-30×50-NS	RL13-35×60-NS	RL13-40×70-NS	RL13-50×100-NS
功率(kW)	30	35	50	75	90
最大装载量(kg)	50	55	100	150	200

注:型号中第一列数字 13 表示工作温度 1300°C,第二列数字分别表示工作区尺寸直径(cm)×高度(cm)

4) RL 系列内热式流态粒子炉 RL 系列内热式流态粒子炉的型号规格及技术数据见表 9-40。RL 系列内热式石墨流态粒子炉用电极加热,布风板为耐火材料透气砖,床层下部为 40~60 目刚玉砂,上部为 40~80 目石墨粒子,采用可控硅调压器控温,控温精度达±3°C。

表 9-40 RL 系列流态床炉的主要技术数据

型 号	RL-30-10	RL-45-10	RL-75-10	RL-100-10
额定功率(kW)	30	45	75	100
额定电压(V)	110、140	110、150	110、160	110、160
温度(°C)	1000	1000	1000	1000
炉膛(mm)(长×宽×深)	250×350×420	300×400×500	400×500×550	450×550×600

(续表)

型 号	RL-30-10	RL-45-10	RL-75-10	RL-100-10
空炉升温时间(min)		35~60	40~76	45~75
空炉损耗功率(kW)		10	20	
风室压力(kPa)		2~6	2~6	
空气流量(m <sup>3</sup> /h)		18~25	30~40	
石墨装载量(kg)		40	70	

注：型号中第一列数字——额定功率，第二列数字——工作温度 1 000℃，风室压力均为 2~6 kPa。

### 三、燃料炉

#### 1. 燃料炉的基本类型

燃料炉是利用燃料燃烧发出的热量对工件加热升温进行热处理的设备。燃料炉用途广泛，能满足常规热处理的要求。

燃料炉按照燃料的种类分，有固体、液体和气体燃料炉三种。固体燃料炉因燃烧不完全易产生黑烟、炉温均匀性差、污染环境而逐渐被淘汰。

按燃料炉的炉型结构、用途来分，常用的热处理燃料炉的类型见表 9-41。

表 9-41 热处理燃料炉的类型

炉 型	温度(℃)	结 构 特 点	用 途
室式热处理炉	650~950	室状炉膛，升降式启闭炉门，炉底设置燃烧室，设有多条燃烧通道	小批量、小型工件热处理
台车式热处理炉	650~1 350	箱式炉膛，活动式台车炉底，进出料方便	大型、中型或批量工件热处理
井式热处理炉	650~1 100	圆井式炉膛，有炉罐式与无炉罐式。炉盖在顶部，工件可吊挂加热	适用于轴、杆状工件热处理
连续式热处理炉	650~1 100	炉膛划分几个温度区，机械化送料，炉型有输送带式炉、推杆式炉、环型炉和辊底炉等	中、小型工件批量热处理。可用于光亮淬火、渗碳、碳氮共渗、回火等
罩式热处理炉	650~1 100	由外罩、内罩及炉台组成，外罩为加热式，内外罩可移动	工件批量热处理。主要用于退火、正火及去应力退火
步进式热处理炉	650~950	炉膛划分几个温度区，炉底固定，由步进机构传送工件前进，为连续式炉	规则工件成批连续热处理
振底式热处理炉	650~1 100	炉膛分不同温度区，连续加热，采用炉底振动运送工件	中、小型零件批量热处理
牵引式热处理炉	900~1 000	通过牵引机构，牵引钢带或钢丝在炉内加热	钢带、钢丝的淬火加热。工件变形很小

#### 2. 燃料炉的燃料类型

通常有固体、液体、气体三类，具体见表 9-42。

表 9-42 常用燃料类别

类 别	一 次 燃 料	二 次 燃 料
固体燃料	无烟煤、烟煤、褐煤、泥煤、煤矸石等	焦炭、煤粉等
液体燃料	原油	重油、重柴油、轻柴油、渣油、调混燃料油等
气体燃料	天然气	高炉煤气、焦炉煤气、混合煤气、城市煤气、发生炉煤气、液体石油气



## 3. 燃料炉的燃烧装置

热处理燃料炉常用的燃烧装置有燃气烧嘴、燃油烧嘴、煤粉烧嘴、燃煤机及辐射管等。

## 1) 燃气烧嘴

(1) HY-GN型天然气烧嘴。烧嘴的型号及性能数据见表9-43。

表9-43 HY-GN系列天然气烧嘴的型号及性能数据

型号	最小流量 (m <sup>3</sup> /h)	最大流量 (m <sup>3</sup> /h)	标准发热量 (kcal/h)	燃气气压 (烧嘴前)	助燃风压 (Pa)	助燃风量 (m <sup>3</sup> /h)	空气比例	配置
HY-GN-2	1.0	3.2	20 000	1 000~ 2 000 Pa	50~100	5~16	1:10	单点火 电极(点火 电极+火焰 探测电极)
HY-GN-3	1.5	4.4	30 000		80~150	8~22		
HY-GN-4	2.0	5.6	40 000		100~200	10~28		
HY-GN-5	2.5	6.8	50 000		120~250	13~34		
HY-GN-6	3.0	8.2	60 000		160~300	15~41		
HY-GN-7	3.5	9.4	70 000		200~350	18~47		
HY-GN-8	4.0	10.6	80 000		240~400	20~53		
型号	标准流量 (m <sup>3</sup> /h)	标准发热量 (kcal/h)	燃气气压 (烧嘴前)	燃气气压 (烧嘴上)	助燃风压 (烧嘴上)	助燃风量 (m <sup>3</sup> /h)	空气比例	
HY-GN-10	12	100 000	2 000~ 3 000 Pa	200~ 1 500 Pa	200~ 1 500 Pa	120~600	1:10	
HY-GN-20	24	200 000						
HY-GN-30	36	300 000						
HY-GN-40	48	400 000						
HY-GN-50	60	500 000						
型号	标准流量 (m <sup>3</sup> /h)	标准发热量 (kcal/h)	燃气气压 (烧嘴前)	燃气气压 (烧嘴上)	助燃风压 (烧嘴上)	助燃风量 (m <sup>3</sup> /h)	空气比例	
HY-GN-70	83	700 000	2 000~ 3 000 Pa	500~ 2 500 Pa	500~ 2 500 Pa	830~ 1 900	1:10	
HY-GN-100	120	1 000 000						
HY-GN-130	155	1 300 000						
HY-GN-160	190	1 600 000						

(2) HY-GL型液化石油气(LPG)烧嘴。烧嘴的型号及性能数据见表9-44。

表9-44 HY-GL型液化石油气烧嘴的型号及性能数据

型号	最小流量 (m <sup>3</sup> /h)	最大流量 (m <sup>3</sup> /h)	标准发热量 (kcal/h)	燃气气压 (烧嘴前)	助燃风压 (Pa)	助燃风量 (m <sup>3</sup> /h)	空气比例	配置
HY-GL-2	0.2	1.0	20 000	1 000~ 3 000 Pa	50~100	4~20	1:25	单点火 电极(点火 电极+火焰 探测电极)
HY-GL-3	0.5	1.5	30 000		80~150	10~30		
HY-GL-4	0.8	2.0	40 000		100~200	16~40		
HY-GL-5	1.0	2.5	50 000		150~250	20~50		
HY-GL-6	1.2	3.0	60 000		180~300	24~60		
HY-GL-7	1.5	3.5	70 000		200~350	30~70		
HY-GL-8	1.8	4.0	80 000		220~400	36~80		

(续表)

型号	标准流量 (m <sup>3</sup> /h)	标准发热量 (kcal/h)	燃气气压 (烧嘴前)	燃气气压 (烧嘴上)	助燃风压 (烧嘴上)	助燃风量 (m <sup>3</sup> /h)	空气比例
HY-GL-10	4	100 000	2 000~ 3 000 Pa	200~ 1 500 Pa	200~ 1 500 Pa	100~500	1:25
HY-GL-20	8	200 000					
HY-GL-30	12	300 000					
HY-GL-40	16	400 000					
HY-GL-50	20	500 000					
型号	标准流量 (m <sup>3</sup> /h)	标准发热量 (kcal/h)	燃气气压 (烧嘴前)	燃气气压 (烧嘴上)	助燃风压 (烧嘴上)	助燃风量 (m <sup>3</sup> /h)	空气比例
HY-GL-70	30	700 000	2 000~ 3 000 Pa	500~ 2 500 Pa	500~ 2 500 Pa	750~ 1 680	1:25
HY-GL-100	42	1 000 000					
HY-GL-130	54	1 300 000					
HY-GL-160	67	1 600 000					

\* 1 kcal/h=1.163 W,下同。

(3) 高速烧嘴。高速烧嘴的燃烧气体出口速度可达 100~300 m/s, 但通过掺入二次空气可降低燃烧气体温度和强化对流传热, 均匀炉温。FR 型就是这种类型的烧嘴。结构示意图见图 9-11, 其性能数据见表 9-45。

表 9-45 FR 型高速调温烧嘴性能表

名称	FR-1	FR-2	FR-3	FR-4
燃烧能力(m <sup>3</sup> /h)	60	120	200	300
空气量(空气过剩系数=1.05)(m <sup>3</sup> /h)	72	125	240	360
煤气低发热量(kJ/m <sup>3</sup> )	5 650			
烧嘴前煤气压力(Pa)	3 500~4 500			
烧嘴前空气压力(Pa)	4 000~5 000			
烧嘴出口最高流速(m/s)	≈140			
烧嘴出口气流温度(°C)	200~1 300			
调节比	1:15			

(4) 自身预热烧嘴。自身预热烧嘴是将烧嘴、预热器、排烟系统组合成为一体, 其结构紧凑、热效率高, 能节约燃料。图 9-12 为 FQR 型自身预热烧嘴结构示意图, 表 9-46 是各型自身预热烧嘴的技术性能。

2) 燃油烧嘴 燃油烧嘴(简称油嘴)有低压油嘴和高压油嘴, 高压油嘴以蒸汽或压缩空气为雾化剂, 雾化性能好、燃烧能量高、火焰长噪声大、空气过剩系数较大、氧化脱碳倾向大, 且易引起工件过热, 在热处理炉上较少使用。低压油嘴以空气作为雾化剂, 油的雾化燃烧良好、操作方便、氧化倾向小、适用于热处理炉。常用的油嘴有 RK 型、F 型、F-RF 型、QRF 型、HY-OD 型、HY-OH 型等。

(1) F 型、F-RF 型油压自动化比例调节油嘴。此种油嘴可实现油、空气自动按比例调节, 其结构见图 9-13, F-RF 型油嘴技术性能见表 9-47。

表 9-46 FQR 各型自身预热烧嘴技术性能

烧嘴型号	燃烧能力		烧嘴前燃料压力		蒸汽或压缩 空气压力 (MPa)	风机压力 (kPa)	助燃空气量 (m <sup>3</sup> /h)
	燃油 (kg/h)	燃煤气 (m <sup>3</sup> /h)	燃油 (MPa)	燃煤气 (Pa)			
ZYR-I-20	20	—	≥0.25	—	≥0.5	≥8	242
TQR-I-25	—	天然气 25	—	≥50 000	—		256
JQR-J-50		焦炉煤气 50	—	≥30 000	—		223
FQR-I-150		发生炉煤气 150	—	≥8 000	—		189
DFQR-I-150			—	≥600	—		189
ZYR-I-40			40	—	≥0.25		—
TQR-I-50	—	天然气 50	—	≥50 000	—		512
JQR-J-100		焦炉煤气 100	—	≥30 000	—		446
FQR-I-300		发生炉煤气 300	—	≥8 000	—		378
DFQR-I-300			—	≥600	—		378
ZYR-I-60			60	—	≥0.25		—
TQR-I-75	—	天然气 75	—	≥50 000	—		768
JQR-J-175		焦炉煤气 150	—	≥30 000	—		669
FQR-I-450		发生炉煤气 450	—	≥8 000	—		567
DFQR-I-450			—	≥600	—		567

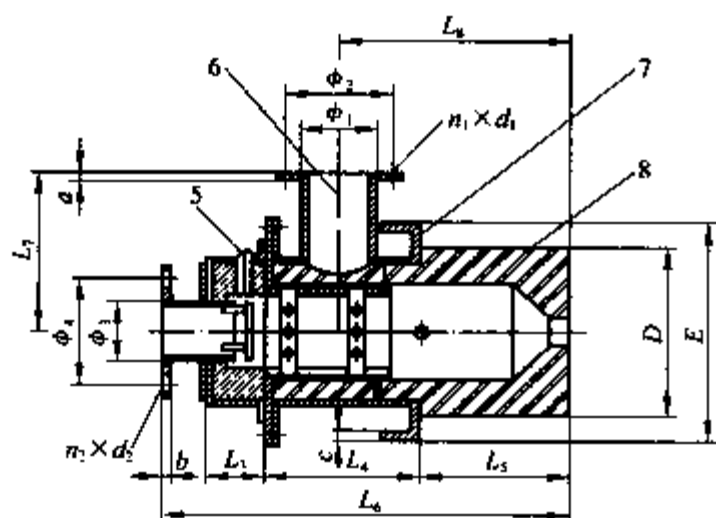


图 9-11 FR 型高速调温烧嘴

1—二次空气管；2—一次空气管；3—煤气接管；4—火焰监测装置；  
5—点火装置；6—空气接管；7—固定板；8—烧嘴砖

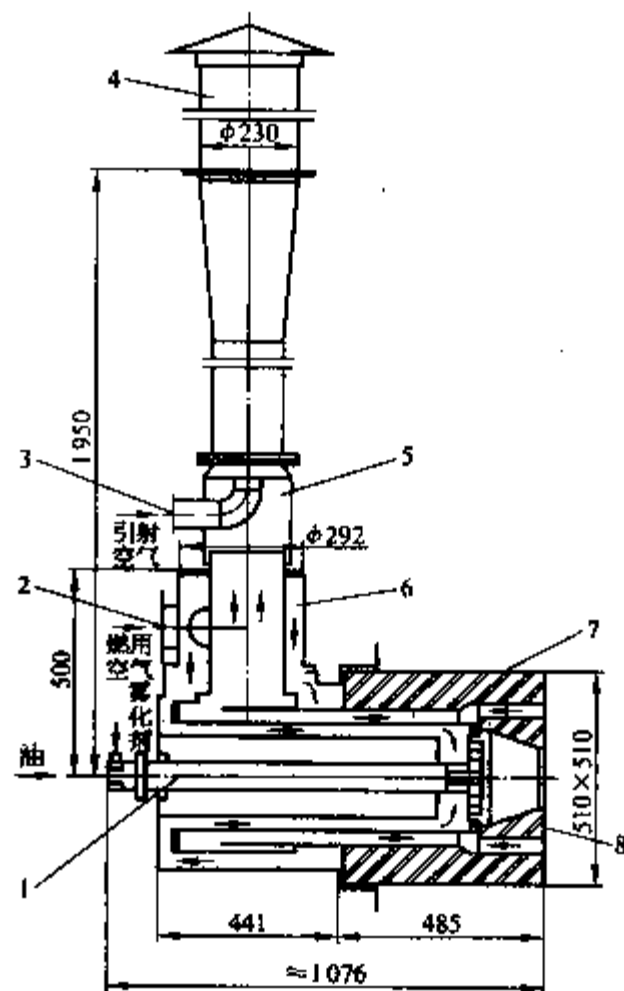


图 9-12 FQR 型自身预热烧嘴结构示意图

1—烧嘴体；2—冷空气进口；3—引射空气进口；4—烟囱；  
5—引射器；6—预热器；7—外烧嘴砖；8—内烧嘴砖

表 9-47 F型、F-RF型油嘴技术性能

型号规格 项目	F-50型、F-RF-50型						F-80型、F-RF-80型					
	供油压力(kPa)	50	100	150	200	250	300	50	100	150	200	250
燃油能力(kg/h)	3.7	7.5	11.2	15.0	18.7	22.5	7.5	15.3	23.2	30.5	38.4	46.0
空气流量(m <sup>3</sup> /h)	43.5	85.6	130	174	217	260	89	175	264	355	440	530
火焰长度(m)	≤1.5						≤2					

型号规格 项目	F-100型、F-RF-100型						F-150型、F-RF-150型					
	供油压力(kPa)	50	100	150	200	250	300	50	100	150	200	250
燃油能力(kg/h)	10.8	21.3	32.0	43.0	53.7	64.0	18.4	36.7	55.0	74.0	92.0	110
空气流量(m <sup>3</sup> /h)	123	247	370	494	618	740	210	420	630	840	1050	1260
火焰长度(m)	≤3						≤4					

(2) QRF型全热风油压自动比例调节油嘴。该型油嘴在助燃空气温度高达500℃时也能良好地燃烧而不发生结焦和堵塞现象,其结构见图9-14。QRF型油嘴额定状况下的技术性能见表9-48。

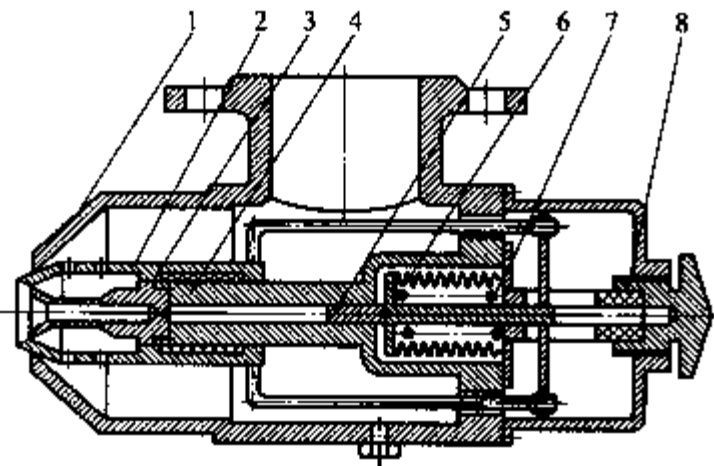


图 9-13 F型、F-RF型油压自动比例调节油嘴

1—壳体; 2—空气喷头; 3—油喷头; 4—液压缸;  
5—柱塞; 6—波纹管; 7—弹簧; 8—比例调节手柄

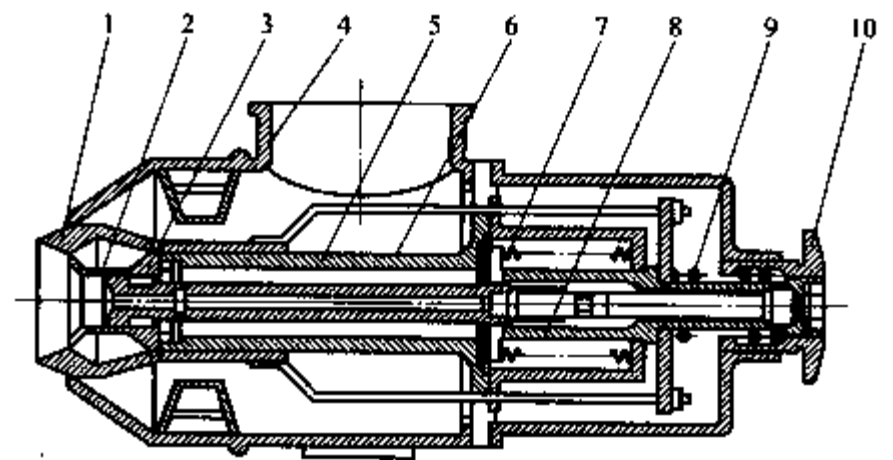


图 9-14 QRF型全热风油压自动比例调节油嘴

1—空气喷头; 2—油喷头; 3—油气芯; 4—空气壳体; 5—油管体;  
6—蒸气芯; 7—波纹管; 8—柱塞; 9—螺旋弹簧; 10—调节手轮

表 9-48 QRF型油嘴额定状态下的技术性能

型号规格 项目	QRF-100						QRF-150						QRF-200					
	供油压力(kPa)	50	100	150	200	250	300	50	100	150	200	250	300	50	100	150	200	250
燃油能力(kg/h)	5	10.8	16	20.7	24.8	30	10.8	21.3	32	43	53.7	64	18.4	36.7	55	74	92	110
空气流量(m <sup>3</sup> /h)	58	120	174	235	298	345	123	247	370	494	618	740	210	420	630	840	1050	1260
空气温度(℃)	500																	
空气压力(kPa)	7.0																	
蒸汽压力(kPa)	50~100																	
蒸汽流量(kg/h)	≈4.5						≈9.6						≈16.5					
火炬张角	20°~25°																	

(续表)

型号规格	QRF-100	QRF-150	QRF-200
项目			
最大射程(m)	≤1.5	≤2.8	≤4
燃料油黏度(m <sup>2</sup> /s)	36.2×10 <sup>-6</sup>		

注: 在非额定状况下使用时, 其实际燃油能力应乘以修正系数 K 值, 见表 9-49。

表 9-49 QRF 型油嘴在非额定状况下燃油能力修正系数 K 值

风温(°C)	风温(°C)				风温(°C)	风温(°C)			
	350	400	450	500		350	400	450	500
3.9	0.842	0.809	0.782	0.755	5.0	1.03	0.99	0.957	0.927
4.9	0.939	0.905	0.873	0.845	6.9	1.113	1.071	1.033	1

(3) HY-OD 型柴油烧嘴。HY-OD 型柴油烧嘴的型号及性能数据见表 9-50。

表 9-50 HY-OD 型柴油烧嘴的型号及性能数据

型号	最小油耗(kg/h)	最大油耗(kg/h)	标准发热量(kcal/h)	雾化风压(kgf/cm <sup>2</sup> ) <sup>①</sup>	雾化风量(m <sup>3</sup> /min)	助燃风压(Pa)	助燃风量(m <sup>3</sup> /h)	使用油压(烧嘴前)
HY-OD-2	0.5	3.5	20 000	0.15~0.4	0.08	200~400	10~15	0.2~0.4 MPa
HY-OD-3	1.5	4.5	30 000	0.25~0.5	0.1	300~500	14~20	
HY-OD-4	2.5	5.5	40 000	0.35~0.6	0.12	400~600	16~25	
HY-OD-5	3.5	6.5	50 000	0.45~0.7	0.15	500~700	18~30	
HY-OD-6	4.5	7.5	60 000	0.55~0.8	0.18	600~800	20~35	
HY-OD-7	5.5	8.5	70 000	0.65~0.9	0.20	700~900	22~40	
HY-OD-8	6.5	9.5	80 000	0.75~1.0	0.22	800~1 000	25~45	
型号	标准油耗(kg/h)	标准发热量(kcal/h)	雾化风压(烧嘴上)	雾化风量(m <sup>3</sup> /min)	助燃风压(烧嘴上)	助燃风量(m <sup>3</sup> /h)	使用油压(烧嘴前)	
HY-OD-10	10	100 000	0.08~0.3 MPa	0.15~0.4	300~1 500 Pa	150~750	0.2~0.6 MPa	
HY-OD-20	20	200 000						
HY-OD-30	30	300 000						
HY-OD-40	40	400 000						
HY-OD-50	50	500 000						
型号	标准油耗(kg/h)	标准发热量(kcal/h)	雾化风压(烧嘴上)	雾化风量(m <sup>3</sup> /min)	助燃风压(烧嘴上)	助燃风量(m <sup>3</sup> /h)	使用油压(烧嘴前)	
HY-OD-70	70	700 000	0.12~0.4 MPa	0.2~0.6	800~2 500 Pa	1 050~2 400	1:25	
HY-OD-100	100	1 000 000						
HY-OD-130	130	1 300 000						
HY-OD-160	160	1 600 000						

注: ① 1 kgf/cm<sup>2</sup> = 0.098 066 5 MPa, 下同。


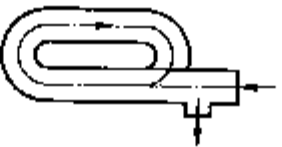
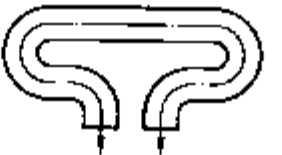
(4) HY-OH 型重油烧嘴。HY-OH 型重油烧嘴的型号及性能数据见表 10-51。

表 9-51 HY-OH 型重油烧嘴的型号及性能数据

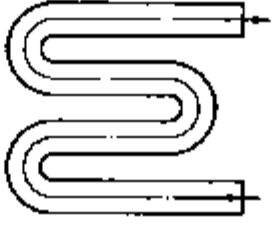
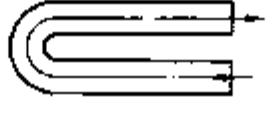
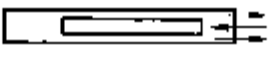
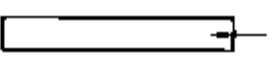
型号	最小油耗 (kg/h)	最大油耗 (kg/h)	标准发热量 (kcal/h)	雾化风压 (kgf/cm <sup>2</sup> )	雾化风量 (m <sup>3</sup> /min)	助燃风压 (Pa)	助燃风量 (m <sup>3</sup> /h)	使用油压 (烧嘴前)
HY-OH-2	0.5	3.5	20 000	0.15~0.4	0.08	200~400	10~15	0.2~0.4 MPa
HY-OH-3	1.5	4.5	30 000	0.25~0.5	0.1	300~500	14~20	
HY-OH-4	2.5	5.5	40 000	0.35~0.6	0.12	400~600	16~25	
HY-OH-5	3.5	6.5	50 000	0.45~0.7	0.15	500~700	18~30	
HY-OH-6	4.5	7.5	60 000	0.55~0.8	0.18	600~800	20~35	
HY-OH-7	5.5	8.5	70 000	0.65~0.9	0.20	700~900	22~40	
HY-OH-8	6.5	9.5	80 000	0.75~1.0	0.22	800~1 000	25~45	
型号	标准油耗 (kg/h)	标准发热量 (kcal/h)	雾化风压 (烧嘴上)	雾化风量 (m <sup>3</sup> /min)	助燃风压 (烧嘴上)	助燃风量 (m <sup>3</sup> /h)	使用油压 (烧嘴前)	
HY-OH-10	10	100 000	0.1~ 0.35 MPa	0.2~0.5	300~ 1 500 Pa	150~750	0.2~0.6 MPa	
HY-OH-20	20	200 000						
HY-OH-30	30	300 000						
HY-OH-40	40	400 000						
HY-OH-50	50	500 000						

3) 火焰辐射管 辐射管由管、燃烧装置和预热器组成。火焰辐射管将管内燃料燃烧产生的热量通过辐射管外壁以辐射方式间接加热零件,其表面负荷一般为  $3.5\sim 4.6 \text{ W/cm}^2$ ,容积负荷为  $465\sim 870 \text{ W/cm}^3$ ,辐射管常用含铬与镍的耐热钢制造。各类火焰辐射管的热工特性及用途见表 9-52,其中套管型辐射管、U 型辐射管的结构简图见图 9-15、图 9-16。火焰辐射管性能见表 9-53。

表 9-52 火焰辐射管类型及热工特性

名称	形状	表面负荷 [kJ/(cm <sup>2</sup> ·h)]	热效率 (%)	特点	用途
直管型		12~21	40~50	结构简单,使用方便,效率低	用于炉温 1 000℃ 以下的室式或连续式炉,垂直安装
套管型		12~21	60~75	结构复杂,内套管材料要求高,造价高,热效率高	用于炉温 1 000℃ 以下室式、井式、连续式炉,垂直安装
U 型		12~17	55~65	结构比较简单,应用普遍,空、煤气便于预热,效率较高	用于炉温 1 000℃ 以下的各种炉型,水平安装

(续表)

名称	形状	表面负荷 [kJ/(cm <sup>2</sup> ·h)]	热效率 (%)	特点	用途
W型		12~15	55~65	用一个烧嘴得到较大的传热面积, 热效率较高	用于炉温 900℃ 以下的立式炉、回转式炉等, 水平安装
O型		12~15	50~60	结构随炉型而定, 结构较复杂, 温度分布不够均匀	用于炉温 900℃ 以下的罩式炉, 水平安装
P型		3~6	50~60	烟气再循环, 结构复杂, 热应力大, 寿命较低	同 U 型管, 较少采用
三叉型		16~21	60~65	两个烧嘴共用一个排气管, 燃烧能力强, 温度较均匀	同 U 型管, 加热能力强

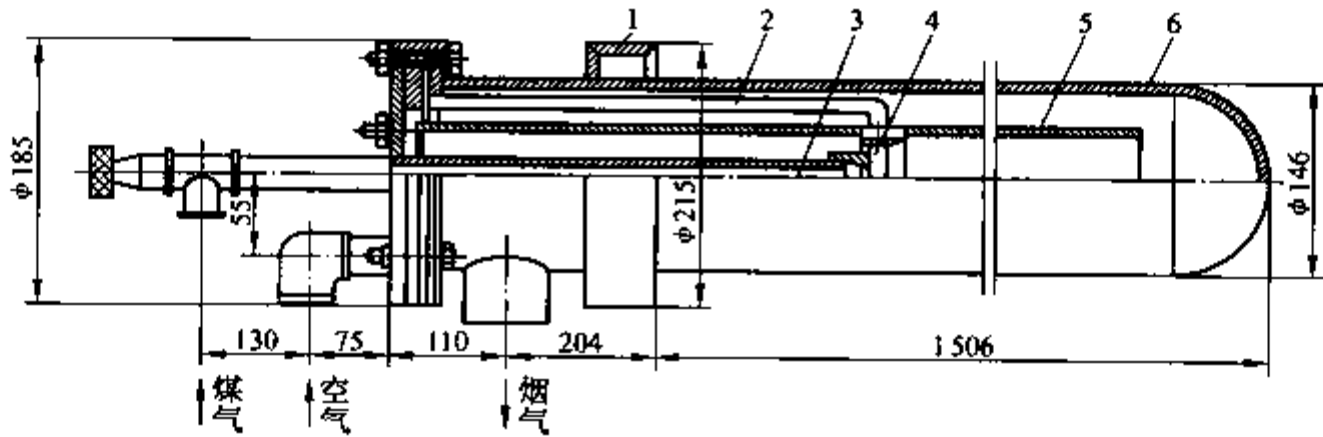


图 9-15 套管型辐射管(燃发生炉煤气)

1—封刀; 2—预热器; 3—煤气导管; 4—喷嘴; 5—内管; 6—外管

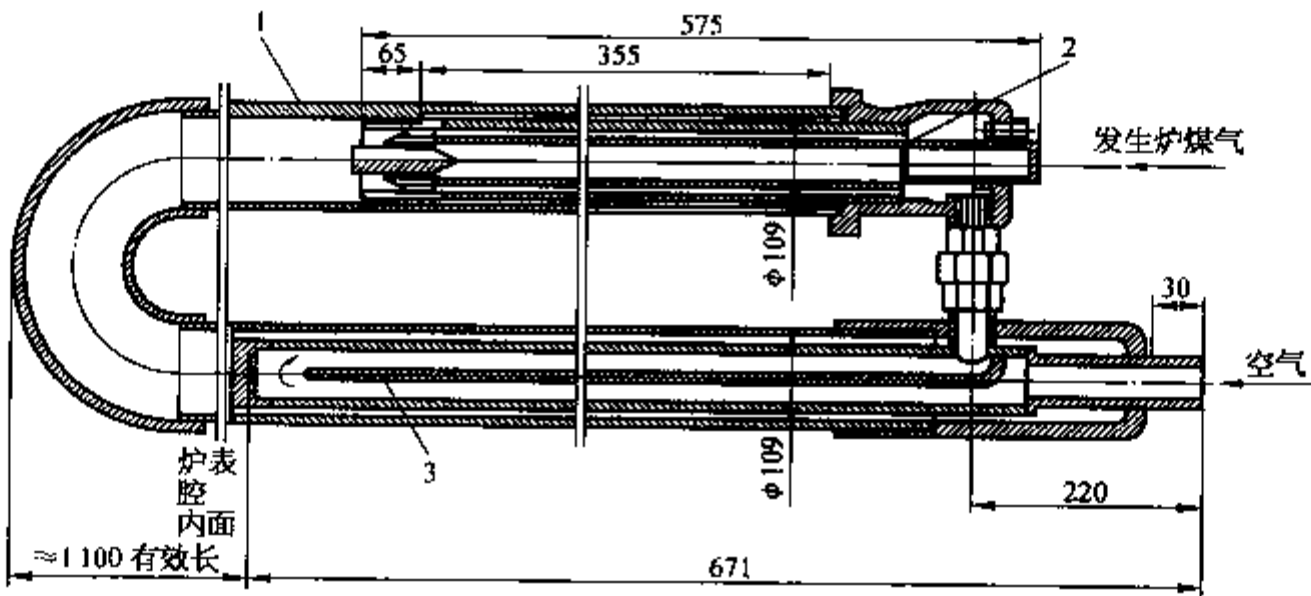


图 9-16 U型辐射管(燃天然气)

1—管体; 2—燃烧装置; 3—预热器

表 9-53 火焰辐射管性能表

类 型		套管型辐射管	U 型辐射管	
燃料	种 类	发生炉煤气	发生炉煤气	天然气
	低发热量(kJ/m <sup>3</sup> )	6 070	5 230~5 650	34 960
	管前压力(kPa)	2.5~3	9~11	5~8
燃烧能量(m <sup>3</sup> /h)		13~14	30~35	2.6~5.2
空气	消耗量(m <sup>3</sup> /h)	23~25	34~41	31~62
	混合比		1.16	
	管前压强(kPa)	1.7~2	2.5	10
	空气预热温度(°C)	800~900	350~400	300
管壁平均温度(°C)		1 010	1 052	1 100
烟气温度(°C)		640~700	800~900	900~950
管体材料		Cr18Ni25Si2	Cr18Ni25Si2	1Cr18Ni9Ti Cr18Ni25Si2

## 4. 燃料炉的型号规格

## 1) 天然气加热燃料炉

(1) 箱式燃气炉的型号规格见表 9-54。

表 9-54 箱式燃气炉型号规格

型 号	QX-12060-13	QX-15075-13	QX-18090-13	QX-12060-10	QX-15075-10
工作区尺寸 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	1 200×600×500	1 500×750×600	1 800×900×700	1 200×600×500	1 500×750×600
工作温度(°C)	1 350	1 350	1 350	1 000	1 000
型 号	QX-18090-10	QX-12060-7	QX-15075-7	QX-18090-7	QX-240120-7
工作区尺寸 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	1 800×900×700	1 200×600×500	1 500×750×600	1 800×800×700	2 400×1 200×800
工作温度(°C)	1 000	700	700	700	700
用 途	主要供金属工件在天然气氛中进行淬火、退火、正火、回火等热处理。也可用于其他材料在 1 350°C 以下的加热				
特 点	1) 采用高质量燃气燃烧器和高性能的燃烧控制系统对天然气燃烧进行有效控制 2) 1 000°C、700°C 系列可采用炉罐隔焰燃烧, 可通保护气, 实现无氧化加热				

(2) 台车式燃气炉的型号规格见表 9-55。

表 9-55 台车式燃气炉型号规格

型 号	QT-18090-13	QT-220110-13	QT-240120-13	QT-350150-13	QT-450180-13
工作区尺寸 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	1 800×900×650	2 200×1 100×750	2 400×1 200×800	3 500×1 500×1 000	4 500×1 800×1 500
工作温度(°C)	1 350	1 350	1 350	1 350	1 350



(续表)

型 号	QT-600220-13	QT-18090-10	QT-220110-10	QT-240120-10	QT-350150-10
工作区尺寸 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	6 000×2 200×1 800	1 800×900×650	2 200×1 100×750	2 400×1 200×800	3 500×1 500×1 000
工作温度(℃)	1 350	1 000	1 000	1 000	1 000
型 号	QT-240120-7	QT-350150-7	QT-450180-7	QT-600220-7	QT-900300-7
工作区尺寸 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	2 400×1 200×1 500	3 500×1 500×1 000	4 500×1 800×1 500	6 000×2 200×1 800	9 000×3 000×2 500
工作温度(℃)	700	700	700	700	700
用 途	主要用于金属工件,尤其是大型铸锻件、焊接件的加热、正火、退火等。低温台车炉可用于铝卷、铝棒、铝锭的加热退火				
特 点	1) 采用天然气专用燃烧器,设有自动点火及火焰连续监测、大小火调节、空燃比例调节、炉温自控等装置,可实现燃烧稳定可靠 2) 设有高低压报警、阀门泄漏超温报警、气机故障报警等安全连锁装置 3) 采用新型复合炉衬(或全纤维炉衬)蓄热少,升温快,节能效果好 4) 台车行走及炉门升降采用电动,有连锁保护,操作轻便安全 5) 低温台车炉设有热风循环装置,炉温均匀度达±5℃以内,满足热处理工艺要求				

## (3) 井式燃气炉:

① 井式燃气回火炉的型号规格见表 9-56。

② 燃气真空罩式炉的型号规格见表 9-57。

表 9-56 井式燃气回火炉型号规格

型 号	QJ6-1	QJ6-2	QJ6-3	QJ6-4	QJ6-5
工作区尺寸 (直径×高度) (mm×mm)	600×800	800×1 200	1 000×1 500	1 200×1 800	1 500×2 000
工作温度(℃)	650	650	650	650	650
用 途	用于轴类零件的垂直加热回火,可减少弯曲变形				
特 点	1) 设有带炉罐或不带炉罐两种,带罐的在罐内安装强循环风扇,炉温均匀 2) 带罐回火炉可通入保护气体,用于钢材等的光亮回火				

表 9-57 燃气真空罩式炉的型号规格

型 号	QZZ7-1	QZZ7-2	QZZ7-3	QZZ7-4
工作区尺寸(mm) (直径×高度)	600×1 000	800×1 200	1 000×1 500	1 200×2 000
工作温度(℃)	750	750	750	750
用 途	供金属线、带材或零件在真空下或保护气氛中进行热处理			
特 点	1) 一个加热罩可供多个炉台使用,加热罩配有快速燃气接头,移动方便 2) 炉罩和炉台间采用特种密封,气密性好			

2) 燃油转底式热处理炉 该炉的型号规格见表 9-58。

表 9-58 燃油特底式热处理炉的型号规格

型 号	主 要 参 数			最大装载量 (kg/h)	用 途
	燃料耗量 (kg/h)	最高工作温度 (℃)	工作区尺寸(mm) (直径×高度)		
GY-92-60	600	1 280	φ6 800×1 500	8 800	供大、中型工件锻造 加热用
GY-92-61	260	1 280	φ4 820×1 044	4 200	
GY-92-62	135	1 280	φ3 100×812	1 800	

## 第二节 冷却设备

冷却设备主要用于热处理工件加热后的淬火等冷却。其结构和性能直接影响到热处理效果和产品质量，因而是热处理主要设备之一。常用的淬火冷却设备有淬火槽、喷射冷却装置、循环冷却装置(系统)、冷处理设备以及淬火压床或专用淬火机等。

### 一、淬火槽

淬火槽是盛装淬火冷却介质，为工件淬火提供足够冷却能力的容器。主要有淬火水槽、油槽和浴槽三种。其结构一般较为简单，有的附有溢流装置、加热装置，有的附有冷却装置、搅拌装置及排烟灭火装置或淬火机械装置等。

#### (一) 淬火冷却水槽

##### 1. 淬火冷却水槽的结构形式

水槽一般根据工件淬火需要自行设计制造。其结构由钢板焊制的槽体、进水管、排水管和溢流槽组成，一般无需冷却装置，有些有搅拌装置或加热装置(如通蒸汽或热水管)。

##### 2. 淬火冷却水槽的容积尺寸的确定

###### 1) 热工计算法确定

(1) 淬火介质需要量( $m^3$ )：

$$V_{\text{水}} = \frac{P(c_1 T_1 - c'_1 T'_1)}{1\,000c_2(T'_2 - T_2)}$$

式中  $P$ ——淬火工件小时生产率(kg/h)；

$T_1, T'_1$ ——工件冷却开始及終了温度；通常  $T'_1 = 100 \sim 200^\circ\text{C}$ ；

$c_1, c'_1$ ——工件在冷却开始温度及終了温度时的比热容，在  $T_1 = 850 \sim 900^\circ\text{C}$  时，高碳钢的  $c_1 \approx 0.678 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ， $T'_1 = 100 \sim 200^\circ\text{C}$  时，高碳钢的  $c'_1 \approx 0.502 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，低合金钢  $c_1, c'_1$  分别为  $0.682 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 、 $0.502 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

$T_2, T'_2$ ——水在工件冷却开始及冷却終了时的温度， $T_2 = 10 \sim 25^\circ\text{C}$ ， $T'_2 = 30 \sim 40^\circ\text{C}$ ；

$c_2$ ——水的平均比热容； $c_2 = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

(2) 淬火冷却水深度确定：

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + L$$

式中  $h$ ——冷却水深度(m)；

$h_1$ ——工件上端至水的距离，取  $0.1 \sim 0.3 \text{ m}$ ；

$h_2$ ——工件下端距槽底距离，一般取  $0.2 \sim 0.3 \text{ m}$ ；

$h_3$ ——工件冷却时上下运动距离，取  $0.2 \sim 0.4 \text{ m}$ ；

$L$ ——工件长度(m)。

(3) 水槽横截面尺寸确定:

$$A = \frac{V_{\text{水}}}{h}$$

式中  $A$ ——横截面积( $\text{m}^2$ );

$V_{\text{水}}$ ——冷却水需要量( $\text{m}^3$ );

$h$ ——冷却水深度(m)。

如果水槽为长方形,且长边  $a$  与短边  $b$  之比  $\frac{a}{b} = n, n$  取 1.2 ~ 1.4, 则

$$a = \sqrt{nA}; b = \sqrt{\frac{A}{n}}$$

如水槽为圆形则

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi}A}$$

(4) 冷却水槽深度确定:

$$H = h + h_1 + h_5$$

式中  $H$ ——水槽深度(m);

$h$ ——冷却水深度(m);

$h_1$ ——水面至槽口距离,取 0.3 m;

$h_5$ ——工件淬入后水面升高高度,  $h_5 = \frac{V_1}{A}$ ,  $V_1$ ——工件的体积。

2) 按淬火工件质量与需求的冷却水质量的对应关系确定(表 9-59)

表 9-59 淬火工件质量与要求的冷却水质量的关系数据

项目 冷却水质量 (kg) 淬火温度 (°C)	淬火后的水温(最初的水温 10°C)									
	20°C ( $\Delta T=10^\circ\text{C}$ )					30°C ( $\Delta T=20^\circ\text{C}$ )				
	钢材的质量(kg)					钢材的质量(kg)				
	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
950	149	298	447	596	745	74	148	222	296	370
900	140	280	420	560	700	70	140	210	280	350
850	133	266	399	532	665	66	132	198	264	330
800	125	250	375	500	625	62	124	186	248	310
750	117	234	351	468	585	58	116	174	232	290

## (二) 淬火冷却油槽

### 1. 淬火冷却油槽的结构形式

淬火冷却油槽的结构、形状及尺寸多种多样,设计制造或选择时只要能满足淬火工件的生产量、尺寸大小和冷却性能即可。常见的淬火油槽结构有:装有冷却蛇形管的淬火槽(见图 9-17);带冷却水套的淬火槽;配有顶置螺旋桨式搅拌器的轴类零件淬火用淬火油槽及附设于循环冷却系统的淬火槽(见图 9-18)等。油槽除了配置冷却装置外,有的还配有加热元件和油温控制系统、导流装置等,以使工件得到均匀冷却并使淬火件畸变量减小到最低限度。

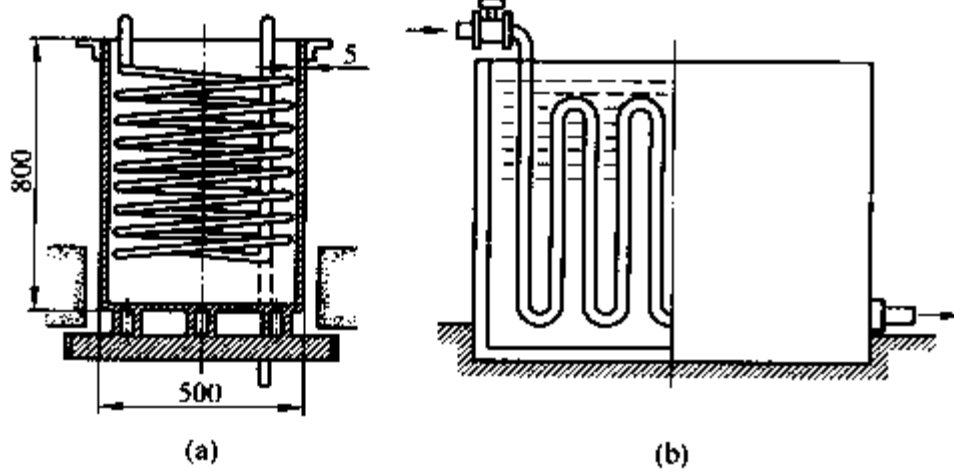


图 9-17 装有冷却蛇形管的淬火槽  
(a) 螺旋形蛇形管; (b) 波形蛇形管

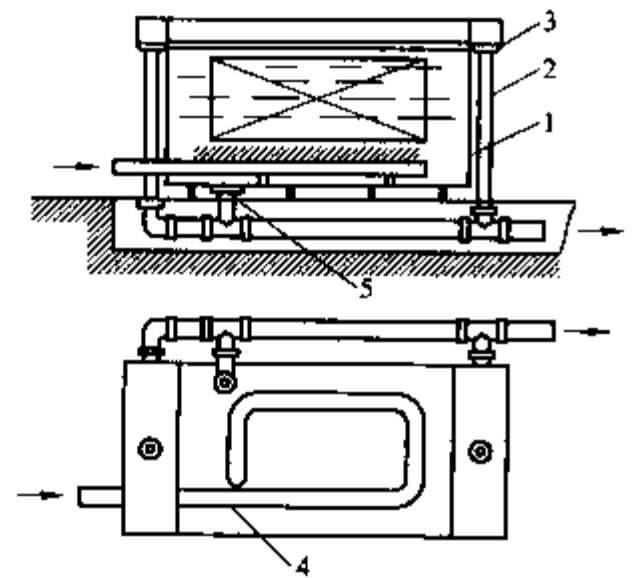


图 9-18 附设于循环冷却系统的淬火槽  
1—淬火槽; 2—排出管; 3—溢流槽;  
4—供入管; 5—事故排出管

## 2. 淬火冷却油槽容积尺寸的确定

1) 淬火油槽容积尺寸的确定 淬火油槽容积尺寸的确定方法基本跟淬火冷却水槽容积尺寸的热工计算法相同,但油的平均比热容  $c_2 = 1.884 \sim 2.093 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ,油冷却开始和终了温度一般为  $T_2 = 20 \sim 50^\circ\text{C}$ ,  $T_2' = 60 \sim 100^\circ\text{C}$ ,常用  $60 \sim 80^\circ\text{C}$ 。油的密度为  $870 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

2) 按淬火工件质量与要求冷却油质量的对应关系确定(表 9-60)

表 9-60 淬火工件质量与要求的冷却油质量的关系数据

项目 冷却油质量 (kg) 淬火温度 ( $^\circ\text{C}$ )	淬火后的油温(最初的油温 $50^\circ\text{C}$ )									
	$70^\circ\text{C} (\Delta T=20^\circ\text{C})$					$80^\circ\text{C} (\Delta T=30^\circ\text{C})$				
	钢材的质量(kg)					钢材的质量(kg)				
	10	20	30	40	50	10	20	30	40	50
1000	192 (77)	384 (154)	576 (231)	768 (308)	960 (385)	128 (64)	256 (128)	384 (192)	512 (256)	640 (320)
950	182 (73)	364 (146)	546 (219)	728 (292)	910 (365)	122 (61)	244 (122)	366 (183)	488 (244)	610 (305)
900	172 (69)	344 (138)	516 (207)	688 (276)	860 (345)	115 (58)	230 (116)	345 (174)	460 (232)	575 (290)
850	161 (65)	322 (130)	483 (195)	644 (260)	805 (325)	108 (54)	216 (108)	324 (162)	432 (216)	540 (270)
800	151 (61)	302 (162)	453 (183)	604 (244)	755 (305)	101 (51)	202 (102)	303 (153)	404 (204)	505 (255)

注: 括号中的数字是最初的油温为  $20^\circ\text{C}$ (室温)时的值。

## (三) 淬火冷却浴槽

淬火冷却浴槽主要有低温盐浴炉及碱浴槽,常用于分级淬火、等温淬火和铝合金等轻金属热处理。其盐浴(碱浴)成分及用途见表 9-61。

表 9-61 盐浴(碱浴)成分及用途

成分(质量百分比)	熔化温度(°C)	使用温度(°C)	用 途
30%KCl+20%NaCl+50%BaCl <sub>2</sub>	560	580~650	高速钢与高合金钢的分级淬火
48%CaCl <sub>2</sub> +21%NaCl+31%BaCl <sub>2</sub>	435	480~650	高速钢与高合金钢的分级淬火
NaNO <sub>3</sub>	317	325~600	铝合金淬火、钢的分级等温淬火
KNO <sub>3</sub>	337	350~600	
50% KNO <sub>3</sub> + 50%NaNO <sub>3</sub>	220	250~500	
50% KNO <sub>3</sub> + 50%NaNO <sub>3</sub>	140	150~550	
NaOH	322	350~550	钢的分级淬火
KOH	360	400~550	
65KOH+35%NaOH	155	170~350	
83%KOH+14%NaNO <sub>2</sub> +2%~3%H <sub>2</sub> O	140	150~300	
80%KOH+20%NaOH(另加 6%H <sub>2</sub> O)	130	150~200	
80% KOH + 20% NaOH(另加 5% KNO <sub>3</sub> + 6%~12%H <sub>2</sub> O)	140	150~200	

#### (四) 淬火槽的主要附加装置

##### 1. 加热装置

淬火介质的温度会影响工件的淬火效果。某些介质需要通过加热提高流动性以改善冷却性能。常用的加热装置有：管状加热元件、蒸汽加热管或热水管、外部电阻元件加热、内部电极加热等，分别用于不同槽液的情况。

##### 2. 冷却装置

连续工作的淬火槽应对冷却介质进行适当冷却，使其冷却到原来的工作温度，以维持淬火介质比较稳定良好的冷却性能。淬火介质的冷却装置常见的有水套式冷却装置、蛇形管冷却装置、热交换式冷却器装置及水冷却循环系统等。冷却水套和蛇形管一般仅适用于小型淬火槽，水冷却循环系统可适用于生产批量大或大型淬火槽，冷却器适用于单个淬火槽。

##### 3. 搅拌装置

为促使冷却介质循环流动、温度均匀并提高冷却能力，常在淬火槽中安装机械搅拌装置。搅拌装置的转速应控制在 400 r/min 以下，被搅动的淬火介质流速应  $\leq 1$  m/s。搅拌器根据需要可安装一台或几台。搅拌器的功率一般按淬火槽容积和淬火介质来确定。表 9-62 为淬火容积与机械搅拌器所需功率的参考数据。

表 9-62 淬火容积与机械搅拌器所需功率的参考数据

淬火槽中液体容积(L)	流动速度为 15 m/min 时所需功率	
	淬火油(W/L)	水或盐水(W/L)
190~3 000	0.985	0.788
3 000~7 600	1.182	0.788
>7 600~11 400	1.182	0.985
>11 400	1.382	0.985

#### 4. 排烟灭火装置

排烟灭火装置主要用于淬火油槽、淬火盐浴和金属浴槽,用抽风装置可排除淬火槽蒸发的烟气和其他有毒有害气体。

常用的排烟方法以风机抽吸为主。在淬火槽的两侧或单侧安装抽风口或者在顶部设置吸烟罩,通过抽风机及烟囱排至室外。为防止淬火油着火引起火灾,淬火油槽要备有铁板封盖或安装多孔灭火喷头,喷头均匀设置在淬火槽的四周,一旦油面起火立即盖上铁盖或利用喷头将储气罐的阻燃气体的喷出灭火。

### 二、喷雾冷却和喷液冷却装置

#### 1. 喷雾冷却装置

运用强力风机或喷嘴将水雾化并喷射到淬火件表面进行快速冷却的装置称喷雾冷却装置。这种喷雾冷却方法既可提高冷速又可减少工件畸变量,常用于大型工件的淬火。

为了使工件冷却均匀,工件需要支承、吊挂并转动;同时设计的喷雾装置能调节水压、风压、风量、水量改变冷却能力以满足淬火冷却要求;而且喷嘴的布置要均匀、对称和密集,能环绕工件的四周和喷射到各个部位以实施均匀冷却。

图 9-19 为大型轴类喷雾淬火装置。

#### 2. 喷液冷却装置

将液体冷却介质直接喷射到热处理工件表面使之迅速冷却淬火的装置为喷液冷却装置。喷液冷却特别适用于感应加热、火焰加热的表面淬火,也适用于局部淬火及工件内孔的表面淬火。喷液淬火装置主要由喷嘴泵、淬火工件定位或转动工装以及集液槽组成。喷嘴的位置根据工件的淬火部位和形状来布置。图 9-20 是大型齿轮喷水冷却装置。

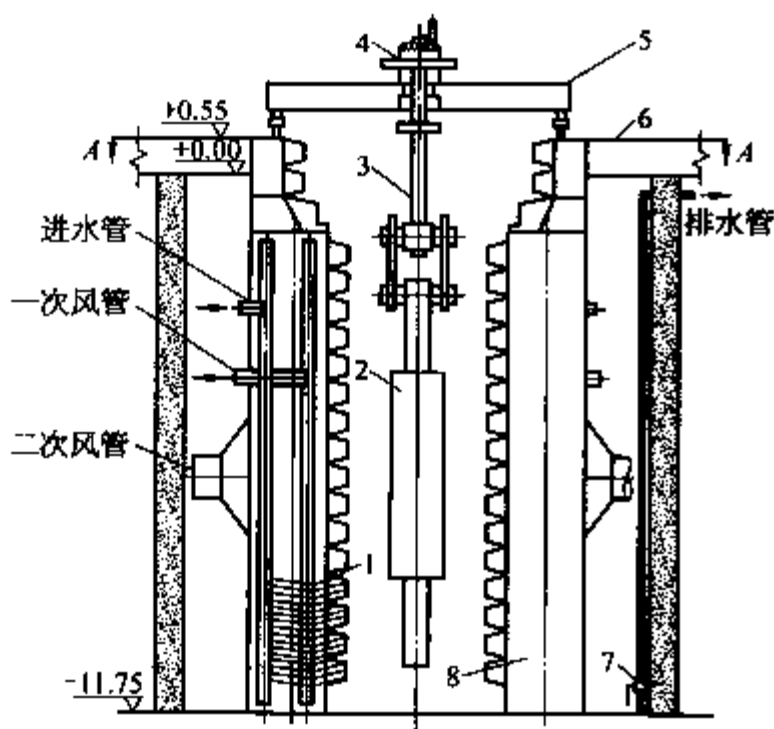


图 9-19 大型轴类喷雾淬火装置

1—喷嘴; 2—工件; 3—穿孔吊具; 4—旋转吊具;  
5—活动横梁; 6—平台; 7—排水泵; 8—喷雾筒

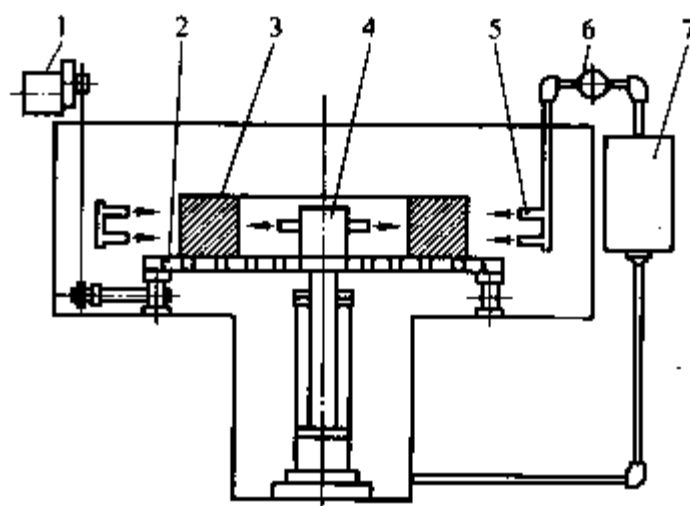


图 9-20 大型齿轮喷水冷却装置

1—传动机构; 2—托盘; 3—工件; 4—喷头;  
5—可伸缩喷头; 6—泵; 7—冷却器

### 三、循环冷却系统

循环冷却系统主要应用于批量工件的连续淬火、大型工件的淬火冷却以及真空加压气淬炉气淬时气体的换热冷却。

#### (一) 循环冷却系统的类型

常见的循环冷却系统有双循环冷却系统、设有储液槽的循环冷却系统和封闭式循环冷却系统。

### 1. 双循环冷却系统

这种冷却系统是淬火冷却介质形成一个循环回路,冷却淬火介质的水又形成一个循环。淬火介质的冷却是通过热交换器与冷却水换热进行的。图 9-21 所示是双循环式的油冷却循环系统,此类冷却系统结构紧凑,无需储液槽,冷却介质的净化是通过过滤器进行的。

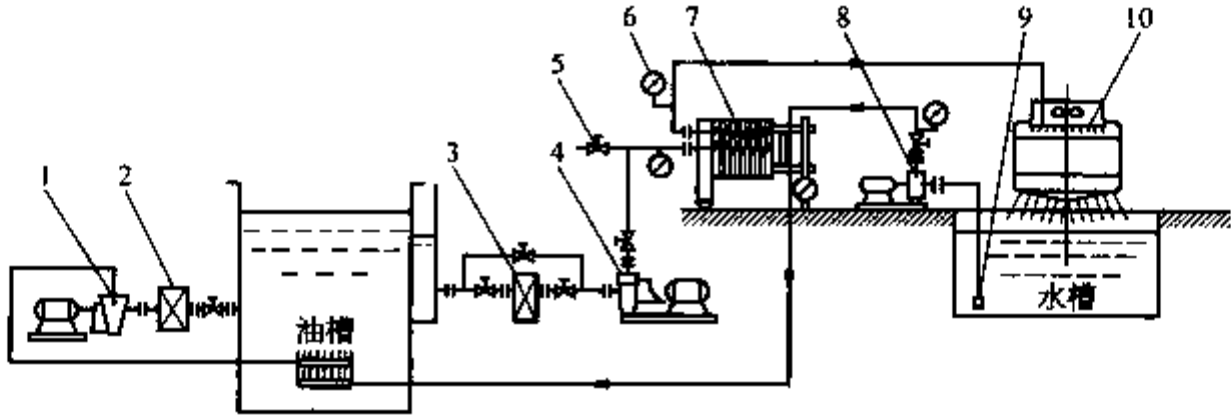


图 9-21 双循环式的油冷却循环系统

1、4—液压泵；2、3—过滤器；5—阀门；6—压力表；7—热交换器；8—水泵；9—底阀；10—冷却水塔

### 2. 设有储液槽的循环冷却系统

这种冷却循环系统设有一个储液槽。泵将冷却介质从储液槽吸入输入到过滤器,过滤后进入热交换器冷却,然后输送到淬火槽中。淬火时槽中温度较高的介质通过溢流槽回流到储液槽,如此反复循环冷却,见图 9-22。也有设两个储液槽的循环冷却系统,该系统采用冷热分开的两个储液池,代替了传统的大容积储液池,即提高了换热效果,又可减少占地面积(储液池可上下布置)。

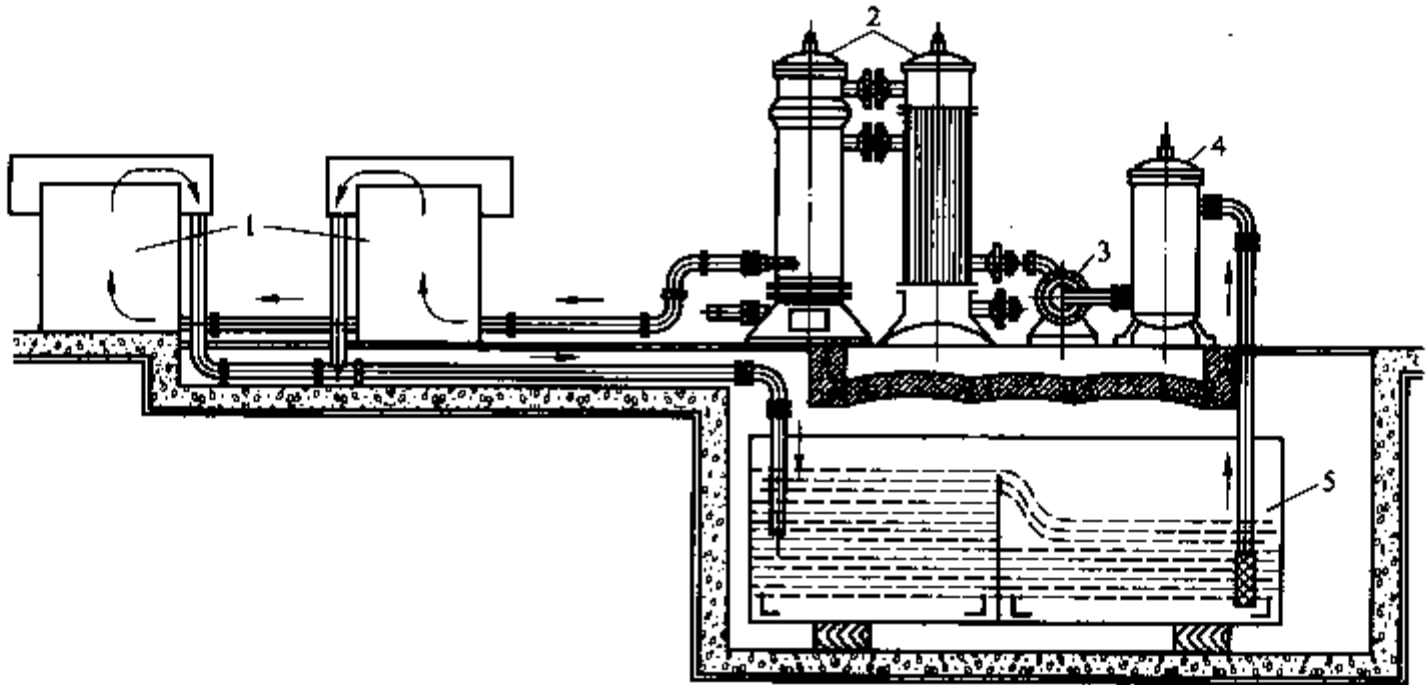


图 9-22 设有储液槽的冷却循环系统

1—淬火槽；2—换热器；3—液压泵；4—过滤器；5—储液槽

### 3. 封闭式循环冷却系统

这种冷却系统主要用于真空气淬炉气淬时的气体换热冷却,以及感应加热的水冷却循环。主要的型号有三种,一种是 FBS 型封闭式铜盘管循环水冷却系统;另一种是 DFL 型封闭式复合翅片管循环水冷却系统;还有一种是 VS II 型封闭式双循环水冷却系统(详见第二章真空热处理)。

#### (二) 循环冷却系统的组成

循环冷却系统由储液槽、冷却器、过滤器、泵及控制系统组成。

##### 1. 储液槽

一般用钢板焊制而成,有圆形和长方形,常用隔板分隔以分别作储液、沉淀和备用之用。容积大于淬火介

质总需量的 30% 左右。

## 2. 冷却器

冷却器也称换热器,有板式、螺旋板式、复波伞式、列管式及喷淋冷却塔式等类型。

1) 板式冷却器 板状冷却器的型号和性能见表 9-63。板式冷却器外形图见图 9-23。板式冷却器的特点是换热效率高、结构紧凑、占地面积少、维修方便、适应性好等。

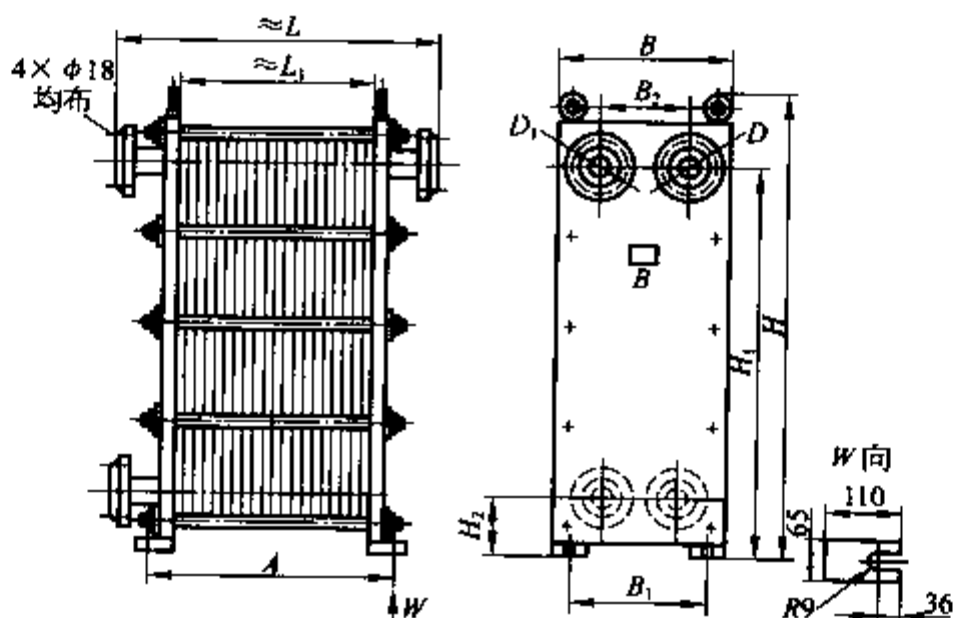


图 9-23 板式冷却器

表 9-63 板状冷却器的型号和性能

型 号	油流量(L/min)		水流量(L/min)		型 号	油流量(L/min)		水流量(L/min)	
	L-AN46 全损耗 系统用油	L-AN32 全损耗 系统用油	L-AN46 全损耗 系统用油	L-AN32 全损耗 系统用油		L-AN46 全损耗 系统用油	L-AN32 全损耗 系统用油	L-AN46 全损耗 系统用油	L-AN32 全损耗 系统用油
BRL0.05-1.5	20	10	16	8	BRL0.5-60	1100	800	900	640
BRL0.05-2	32	16	25	13	BRL0.5-70	1300	1000	1050	800
BRL0.05-2.5	50	25	40	20	BRL0.5-80	2100	1600	1670	1280
BRL0.1-3	80	40	64	32	BRL0.5-120	3000	2100	2400	1600
BRL0.1-5	125	63	100	50	BRL1.0-50	1000	715	850	570
BRL0.1-7	200	100	100	80	BRL1.0-80	2100	1600	1670	1280
BRL0.1-10	250	125	200	100	BRL1.0-100	2500	1800	2040	1440
BRL0.2-13	400	160	320	130	BRL1.0-120	3000	2100	2400	1600
BRL0.2-18	500	250	400	200	BRL1.0-150	3500	2500	2950	2400
BRL0.2-24	600	315	500	250	BRL1.0-180	4000	2850	3500	2600
BRL0.3A-30	650	400	520	320	BRL1.0-200	4500	3150	3800	3000
BRL0.3A-35	700	500	560	400	BRL1.0-250	5000	3500	4400	3400
BRL0.3A-40	950	630	800	500					

注: 型号中最后数字为公称冷却面积( $m^2$ ), 进油温度均为  $50^\circ C$ , 出油温度均为  $\leq 42^\circ C$ , 油压降均  $\leq 0.1 MPa$ , 进水温度均  $\leq 30^\circ C$ 。

2) 螺旋板式冷却器 表 9-64 是不锈钢制螺旋板式换热器( $Pg588 kPa$ )的技术规格及型号, 图 9-24 是螺旋板式换热器示意图。螺旋板式冷却器结构简单, 由两张互相平行的钢板卷制焊接而成, 换热效率



比列管式高 50% 左右,但不可拆卸。

表 9-64 不锈钢制螺旋板式换热器[Pg588 kPa(6 kgf/cm<sup>2</sup>)]技术规格

型 号	计算换 热面积 F(m <sup>2</sup> )	流速为 1 m/s 时处理量 V (m <sup>3</sup> /h)	接管公称 直径 G(mm)	型 号	计算换 热面积 F(m <sup>2</sup> )	流速为 1 m/s 时处理量 V (m <sup>3</sup> /h)	接管公称 直径 G(mm)
I6B1-0.2/300-6	1.0	3.89	40	I6B20-0.4/800-6	21.7	8.21	50
I6B2-0.2/400-6	2.1	3.89	40	I6B20-0.6/800-10	21.0	20.90	80
I6B4-0.4/400-6	4.4	8.21	50	I6B20-0.8/800-14	20.9	39.30	100
I6B4-0.4/500-10	4.8	13.7	70	I6B25-0.6/900-10	26.6	20.90	80
I6B8-0.4/500-6	7.3	8.21	50	I6B25-0.8/900-14	26.9	39.20	100
I6B8-0.6/500-10	7.3	20.50	80	I6B30-0.8/800-10	28.2	28.10	100
I6B10-0.4/600-6	11.1	8.21	50	I6B30-0.8/1000-14	32.0	39.20	100
I6B10-0.6/600-10	11.2	20.50	80	I6B40-1.0/900-10	45.4	35.30	100
I6B15-0.6/600-6	16.9	12.54	70	I6B40-1.0/1000-14	40.2	49.40	125
I6B15-0.8/600-10	15.0	28.10	80	I6B50-1.0/1000-10	53.9	35.30	100
I6B15-0.8/700-14	15.6	39.30	100				

注:型号中第一列中末位数字表示公称换热面积(m<sup>2</sup>),最末位数字表示螺旋隔板间距(mm)。

3) 列管式冷却器 列管式冷却器有立式与卧式两种,占地面积小,可串联或并联使用,有较好的换热效率,但不便于维修。ZX 型列管式冷却器的技术性能见表 9-65;ZLQ 系列列管式冷却器技术规格见表 9-66;列管式冷却器示意图见图 9-25。

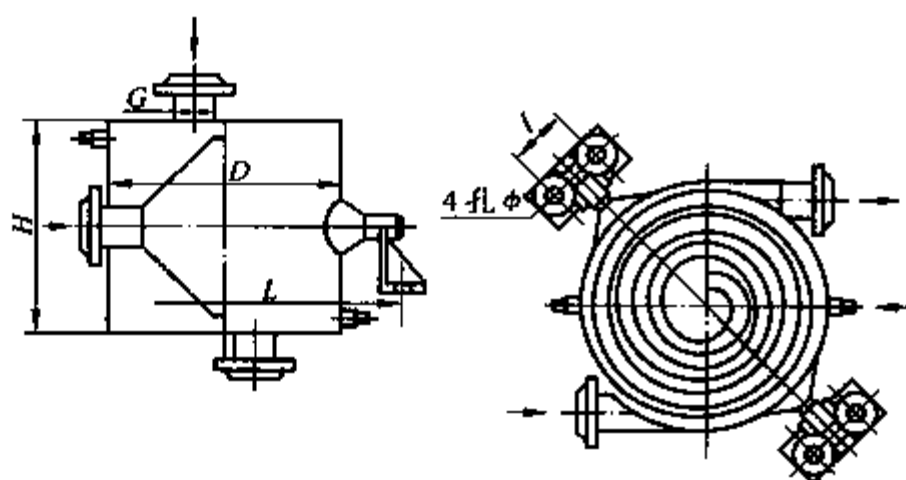


图 9-24 螺旋板式换热器

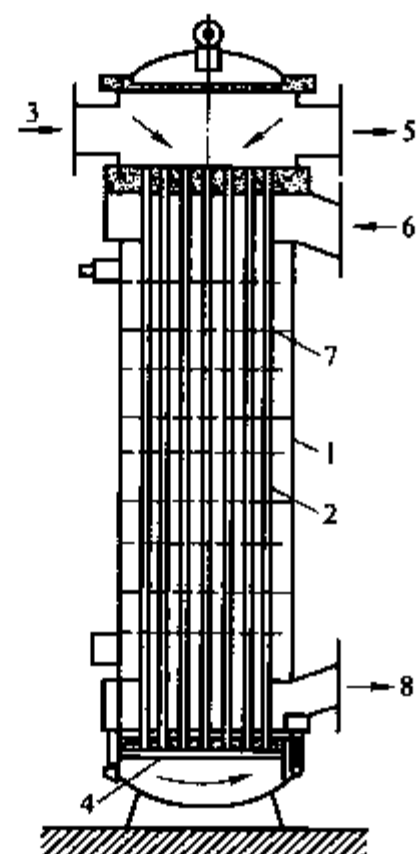


图 9-25 列管式冷却器

1—筒体; 2—冷却管; 3—进水口;  
4—管板; 5—出水口; 6—进油口;  
7—折流板; 8—出油口

表 9-65 列管式冷却器的技术性能

型号	冷却面积(m <sup>2</sup> )	生产能力(L/min)	耗水量(L/min)
ZX03.1	3	25~50	60~120
ZX03.2	6	50~125	120~327
ZX03.3	12	125~300	327~458
ZX03.4	25	300~600	458~800
ZX03.5	50	600~900	800~1300
ZX03.6	100	900~1800	1300~2000

表 9-66 列管式冷却器技术规格

项目名称	单位	数 据						
		2LQFW 系列	2LQFL 系列	2LQF <sub>1</sub> W 系列	2LQF <sub>1</sub> L 系列	2LQGW 系列	4LQF <sub>2</sub> W 系列	2LQ-U 系列
换热面积	m <sup>2</sup>	0.5~14	0.5~14	19~290	19~290	0.22~11.45	1.3~5.3	0.38~0.62
传热系数	kJ/(m <sup>2</sup> ·h·℃)	1256~ 1465	1256~ 1465	1256~ 1465	1256~ 1465	1256~ 1465	1884~ 2093	1256~ 1465
设计温度	℃	100	100	120	120	120	80	120
工作介质压力	kPa (kgf/cm <sup>2</sup> )	1568 (16)	1568 (16)	980 (10)	980 (10)	1568 (16)	1568 (16)	1568 (16)
冷却介质压力	kPa (kgf/cm <sup>2</sup> )	784 (8)	784 (8)	490 (5)	490 (5)	980 (10)	392 (4)	392 (4)
油侧压力降	kPa (kgf/cm <sup>2</sup> )	<98 (<1)	<98 (<1)	<98 (<1)	<98 (<1)	<98 (<1)	—	<98 (<1)
介质黏度	m <sup>2</sup> /s(cst)	(0.1~3.26) ×10 <sup>-4</sup> (10~326)	(0.1~3.26) ×10 <sup>-4</sup> (10~326)	(0.1~3.26) ×10 <sup>-4</sup> (10~326)	(0.1~3.26) ×10 <sup>-4</sup> (10~326)	(0.1~3.26) ×10 <sup>-4</sup> (10~326)	(1~5) ×10 <sup>-5</sup> (10~50)	(0.1~3.26) ×10 <sup>-4</sup> (10~326)

4) 玻璃钢冷却塔 该塔为一种敞开式的水循环冷却装置,应用也较广泛,降温效果为 $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$ 左右。表 9-67 是常用的玻璃钢冷却塔的型号和参数。

表 9-67 玻璃钢冷却塔的型号和参数

型号	T=28℃水量(m <sup>3</sup> /h)		主要尺寸(mm)		风机直径 (mm)	电机功率 (kW)	质量(kg)		进水压力 (10 <sup>4</sup> Pa)	噪声 (dB)
	$\Delta T=5^{\circ}\text{C}$	$\Delta T=8^{\circ}\text{C}$	总高度 H	最大直径 D			自重	运转重		
BND-02	2	1	1775	765	340	0.18	60	150	4.05	63
BND-04	4	3	1805	850	500	0.25	80	160	4.11	54
BND-08	8	6	1990	1010	500	0.37	120	270	4.07	65
BND-12	12	9	2130	1350	700	0.55	150	400	4.19	66
BND-15	15	11	2070	1410	800	0.55	180	450	4.27	66
BND-20	20	15	2375	1810	800	1.1	300	700	4.36	66
BND-30	30	22	2570	1915	1000	1.1	350	750	4.35	67

(续表)

型号	T=28℃水量(m <sup>3</sup> /h)		主要尺寸(mm)		风机直径 (mm)	电机功率 (kW)	质量(kg)		进水压力 (10 <sup>4</sup> Pa)	噪声 (dB)
	ΔT=5℃	ΔT=8℃	总高度 H	最大直径 D			自重	运转重		
BND-50	50	38	3 000	2 340	1 200	1.5	500	1 100	4.4	67
BNDL <sub>3</sub> -70	70	51	3 190	2 630	1 600	2.2	790	2 060	4.28	68
BNDL <sub>3</sub> -80	80	61	3 440	2 630	1 600	2.2	870	2 240	4.53	68
BNDL <sub>3</sub> -100	100	74	3 430	3 140	1 800	3.0	970	3 060	4.36	69
BNDL <sub>3</sub> -125	125	92	3 680	3 140	1 800	4.0	1 060	3 290	4.65	69.5
BNDL <sub>3</sub> -150	150	112	3 560	3 740	2 400	4.0	1 700	4 120	4.4	69.5
BNDL <sub>3</sub> -175	175	131	3 800	3 740	2 400	5.5	1 840	4 460	4.45	70
BNDL <sub>3</sub> -200	200	153	3 900	4 340	2 800	5.5	2 130	5 590	4.51	70
BNDL <sub>3</sub> -250	250	186	4 150	4 340	2 800	7.5	2 340	6 360	4.76	71
BNDL <sub>3</sub> -300	300	225	4 260	5 230	3 400	7.5	3 560	9 230	5.00	71.5
BNDL <sub>3</sub> -350	350	267	4 510	5 230	3 400	11.0	3 860	9 910	5.25	72
BNDL <sub>3</sub> -400	400	301	4 640	6 050	3 800	11.0	4 300	12 080	5.10	72
BNDL <sub>3</sub> -450	450	343	4 890	6 050	3 800	11.0	4 600	13 460	5.35	72
BNDL <sub>3</sub> -500	500	375	5 260	6 750	4 200	15.0	5 770	16 250	5.20	72.5
BNDL <sub>3</sub> -600	600	454	5 760	6 750	4 200	18.5	6 580	18 360	5.70	72.5
BNDL <sub>3</sub> -700	700	528	5 540	7 770	5 000	18.5	6 910	23 190	5.95	73
BNDL <sub>3</sub> -800	800	590	6 040	7 770	5 000	22.0	7 980	25 980	6.45	73.5
BNDL <sub>3</sub> -900	900	685	6 080	8 840	6 000	22.0	8 930	32 560	6.25	73.5
BNDL <sub>3</sub> -1000	1 000	783	6 580	8 840	6 000	30.0	11 560	36 420	6.75	74

### 3. 过滤器

过滤器是用于淬火介质冷却系统中的过滤装置,结构较为简单,常用网式或筒形过滤器,效果良好。过滤器的型号及技术性能见表 9-68。

表 9-68 过滤器的型号及技术性能

型 号	公称通径 DN(mm)	过滤面积(m <sup>2</sup> )	外形尺寸(mm×mm×mm)	通过能力(L/min)
SLQ-32	32	0.08	397×340×440	130/310
SLQ-40	40	0.21	480×376×515	330/790
SLQ-50	50	0.31	1 023×330×800	485/1 160
SLQ-65	65	0.52	1 087×374×860	820/1 960
SLQ-80	80	0.83	1 204×370×990	1 320/3 100
SLQ-100	100	1.31	1 337×442×1 190	1 990/4 750
SLQ-125	125	2.20	1 955×755×1 270	3 340/8 000
SLQ-150	150	3.30	1 955×755×1 530	5 000/12 000

注:公称压力皆为 0.6 MPa;通过能力栏中第一个数字为 80 μm 网孔时的通过能力,后一数字为 12 μm 时的能力。

#### 四、冷处理设备

冷处理设备一般分为普通冷处理( $0\sim-80^{\circ}\text{C}$ )设备和深冷处理(低于 $-80\sim-192^{\circ}\text{C}$ )设备,主要用于高速钢,工、模具钢,陶瓷材料等零件的冷处理。常用的冷处理设备(装置)有:

##### 1. 干冰冷处理装置

该装置是利用干冰(固态  $\text{CO}_2$ )的溶解来制冷,结构简单。制作一个双层的具有隔热保温功能的加盖密封容器,放进干冰,加入酒精或丙酮就可作冷处理;能获得 $-78^{\circ}\text{C}$ 的低温。

##### 2. 液氮深冷装置

1) SLX 系列程序控制深冷箱 液氮本身具有 $-196^{\circ}\text{C}$ 的超低温,直接使用液态或液氮气化可对工件作深冷处理。图9-26是深冷箱结构示意图。该深冷箱由箱体、控制箱、液氮传输单元、液氮容器及计算机等组成;能实施对深冷处理工艺参数的智能化控制,且具有工艺设定实时数据采集、显示、记录、保存和查询监测控制功能;控制精度达 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ,温度范围 $-196\sim+200^{\circ}\text{C}$ 任意可调。SLX 程序控制深冷箱技术参数见表9-69。

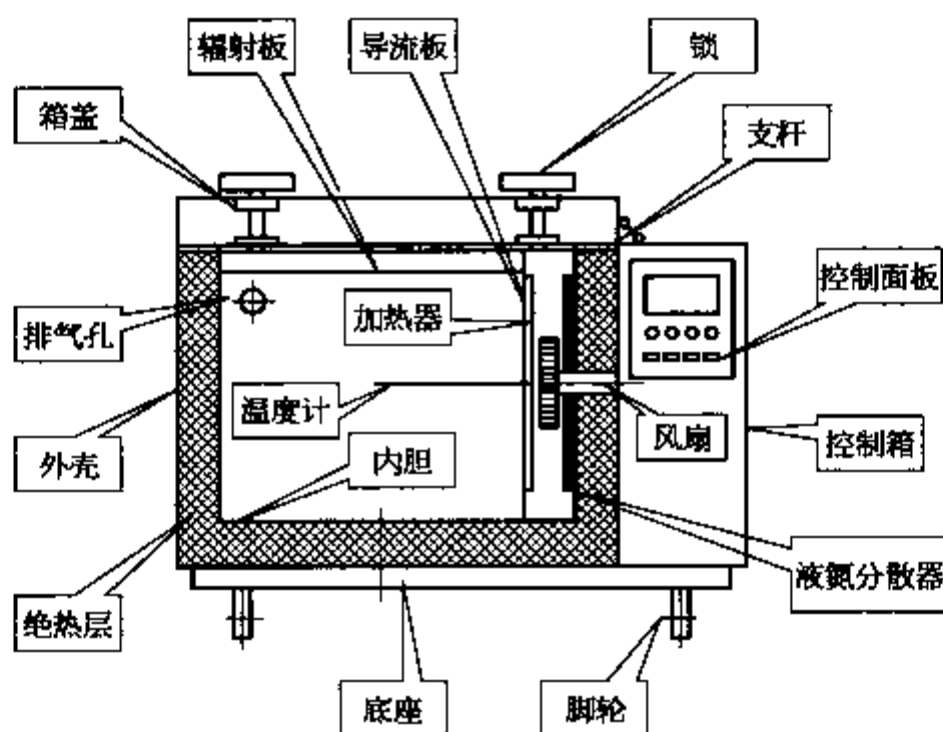


图 9-26 深冷箱结构示意图

表 9-69 SLX 程序控制深冷箱技术参数

型 号	有效尺寸(mm)	容积(L)	冷却能力(kg)
SLX-30	350×300×300	30	50
SLX-50	400×350×350	50	80
SLX-80	500×400×400	80	150
SLX-150	600×500×500	150	300
SLX-250	700×600×600	250	500
SLX-300	800×650×600	310	600
SLX-350	900×650×600	350	700
SLX-450	900×700×700	440	880
SLX-500	1 000×700×700	490	1 000
SLX-650	1 000×800×800	640	1 200

(续表)

型 号	有效尺寸(mm)	容积(L)	冷却能力(kg)
SLX-700	1 280×780×700	700	1 400
SLX-850	1 310×800×800	838	1 500
SLX-100R	φ400×800	100	200
SLX-200R	φ500×1 000	196	400
SLX-350R	φ600×1 200	340	650
SLX-500R	φ700×1 300	500	1 000
SLX-1 000R	φ950×1 500	1 000	2 000

2) 嵌套式深冷处理装置 该装置由内层箱和外层箱组合的嵌套式箱体、制冷压缩机、液氮储运瓶、液氮供给系统和温度控制系统等组成。图 9-27 为嵌套式深冷箱结构简图。

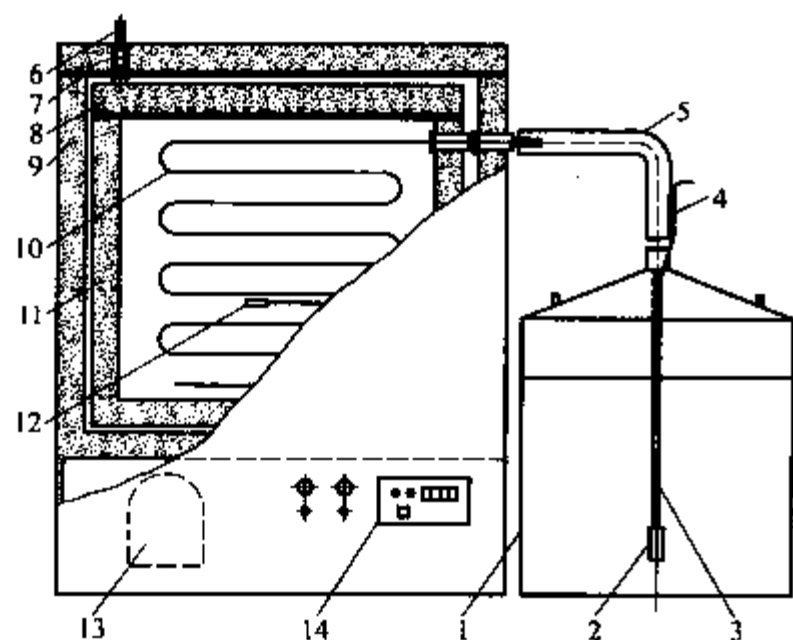


图 9-27 嵌套式深冷箱结构简图

- 1—液氮容器；2—加热器；3—取液氮管；4—加热器导线；  
5—保温软管；6—排气管；7—外层箱盖；8—内层箱盖；  
9—外层箱体(冷藏柜)；10—换热管板；11—内层箱；  
12—铂电阻；13—压缩机；14—数显温度仪表

进行冷处理时，伸入液氮瓶的取液管下端的加热器通电发热，使液氮气化，液氮瓶内压力升高将液氮从取液管压进冷处理箱，液氮气化降温。当箱内降至设定温度以下，加热器断电，液氮罐内压力下降，液氮停止进入冷处理箱，由此控制加热器的加热来控制箱内温度。同时通过测温元件和自动控温器控制压缩机的启闭实现液氮与机械双重制冷。该装置的冷处理温度最低可达 $-190^{\circ}\text{C}$ ，温度均匀度为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，控温方式可设定和数字显示。

### 3. 低温冰箱冷处理装置

低温冰箱为立式箱体结构，箱体夹层采用聚氨酯泡沫塑料绝热；箱体上部为冷处理室，下部安装氟利昂压缩机，箱上装有压力与温度指示控制仪表，能自动控温；冷处理温度范围 $-60\sim-80^{\circ}\text{C}$ 。表 9-70 为四种型号低温箱的主要技术规格。

表 9-70 四种型号低温箱的主要技术规格

项 目 名 称	型 号			
	D8-0.2	D8-0.4	D6-0.6	D6-1.0
使用温度范围( $^{\circ}\text{C}$ )	$-60\sim-80$	$-60\sim-80$	$-40\sim-60$	$-40\sim-60$
最低工作温度( $^{\circ}\text{C}$ )	-80	-80	-60	-60
从 $+35^{\circ}\text{C}$ 降到 $-80^{\circ}\text{C}$ 所需时间(h)	$\leq 2$	$\leq 2.5$	—	—
从 $+35^{\circ}\text{C}$ 降到 $-60^{\circ}\text{C}$ 所需时间(h)	—	—	$\leq 2$	$\leq 2$
有效容积(mm)(长×宽×高)	530×530×700	620×860×750	1 510×800×500	975×1 100×975

注：各种型号的箱体均为立式，控制温度误差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，自动操作方式，制冷剂注入量：氟利昂 22( $\text{CHClF}_2$ )约 4.5 kg，氟里昂 13( $\text{CHClF}_3$ )约 1.2 kg，配用 2F0.5 型压缩机 2 台，电动机功率 4 kW，最高环境温度 $\leq 40^{\circ}\text{C}$ ，冷却水耗量 $\leq 1.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

## 第三节 辅助设施

### 一、工装夹具

#### (一) 工装夹具的设计原则

工装夹具是热处理过程中必须的辅助用具。正确地使用工装夹具有利于热处理生产的安全、可靠,提高产品质量,降低成本。工装夹具一般由工厂按照产品的品种、形状、尺寸大小、质量、热处理工艺要求和使用的热处理设备自行设计制造,其设计时常常要考虑以下几个方面:

(1) 设计的工装夹具应能确保达到产品的热处理技术要求,能使工件受到均匀的加热或均匀的化学热处理和均匀的冷却,从而得到均匀一致的硬度、渗层、组织和较小的畸变量。

(2) 设计的工装夹具在保证热处理质量的前提下,应能达到较大的装炉量,即较高的生产能力,得到较高的能源利用率、较低的夹具成本及满意的高温强度。

(3) 设计的工装夹具应考虑牢固、可靠,能确保设备运行的安全和人身的健康,并且使用方便,装卸简单。

#### (二) 常用的工装夹具

盐浴炉或流态炉专用淬火架及夹具见图 9-28。

井式炉用单件吊具见图 9-29。图 9-30 为真空炉、多用炉、推杆炉料盘及辅件。

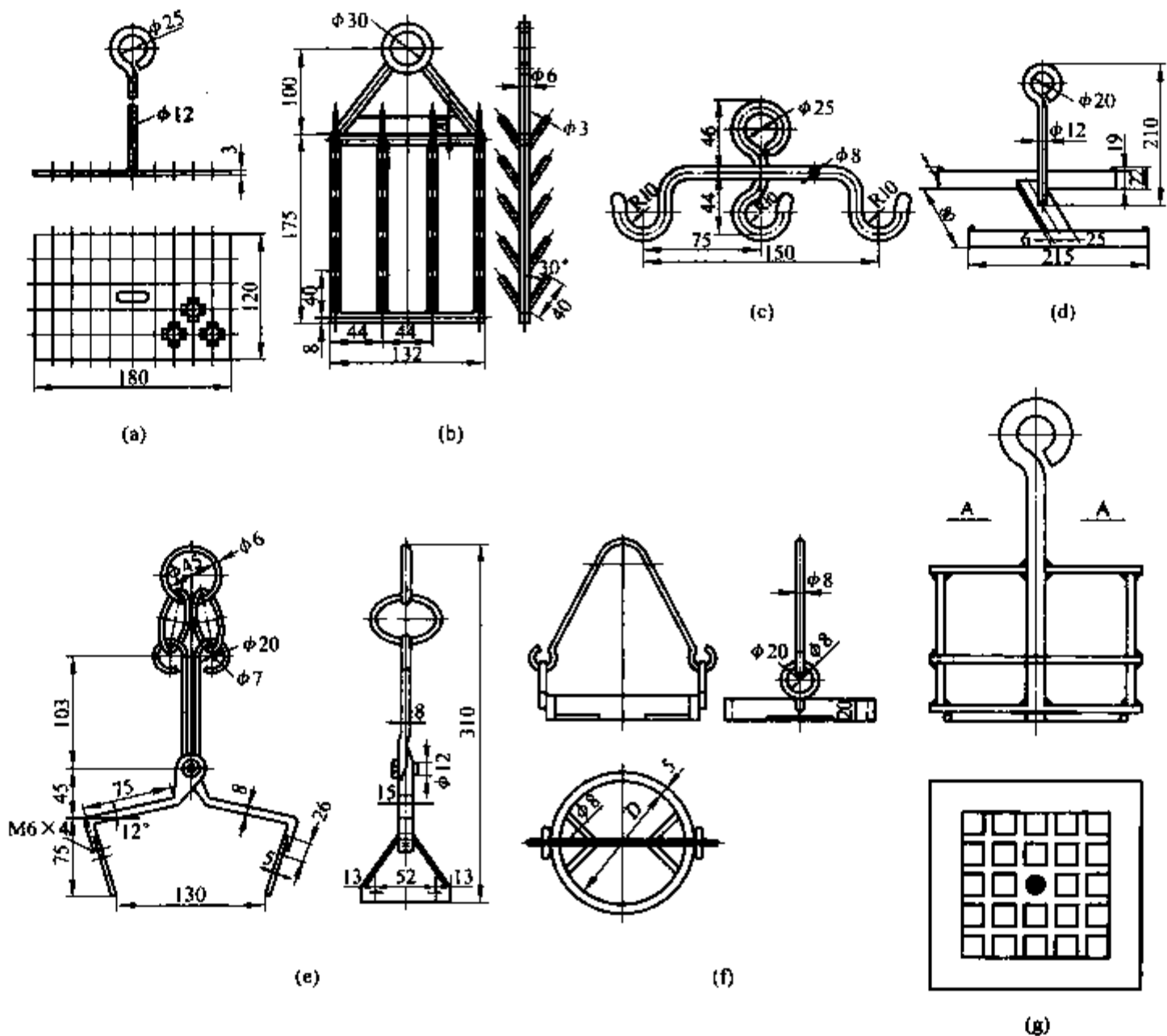


图 9-28 各种专用淬火架及夹具

(a)、(b) 淬火架; (c) 淬火挂具; (d) H 形淬火吊架; (e)、(f)、(g) 淬火夹具

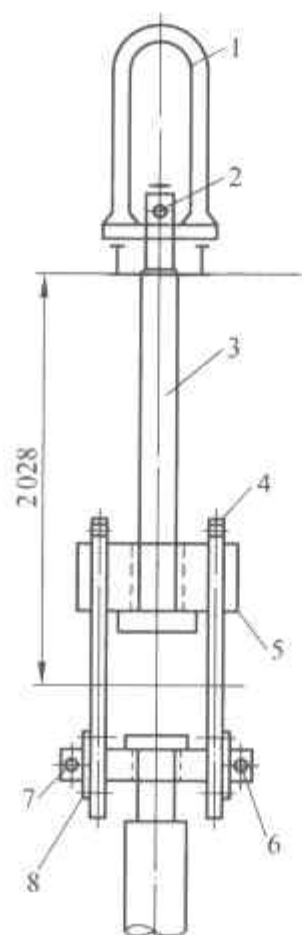


图 9-29 井式炉单件吊具

1—吊环；2—销钉；3—吊杆；4—挂板；5—上吊板；6—螺栓；7—下吊板；8—挡板

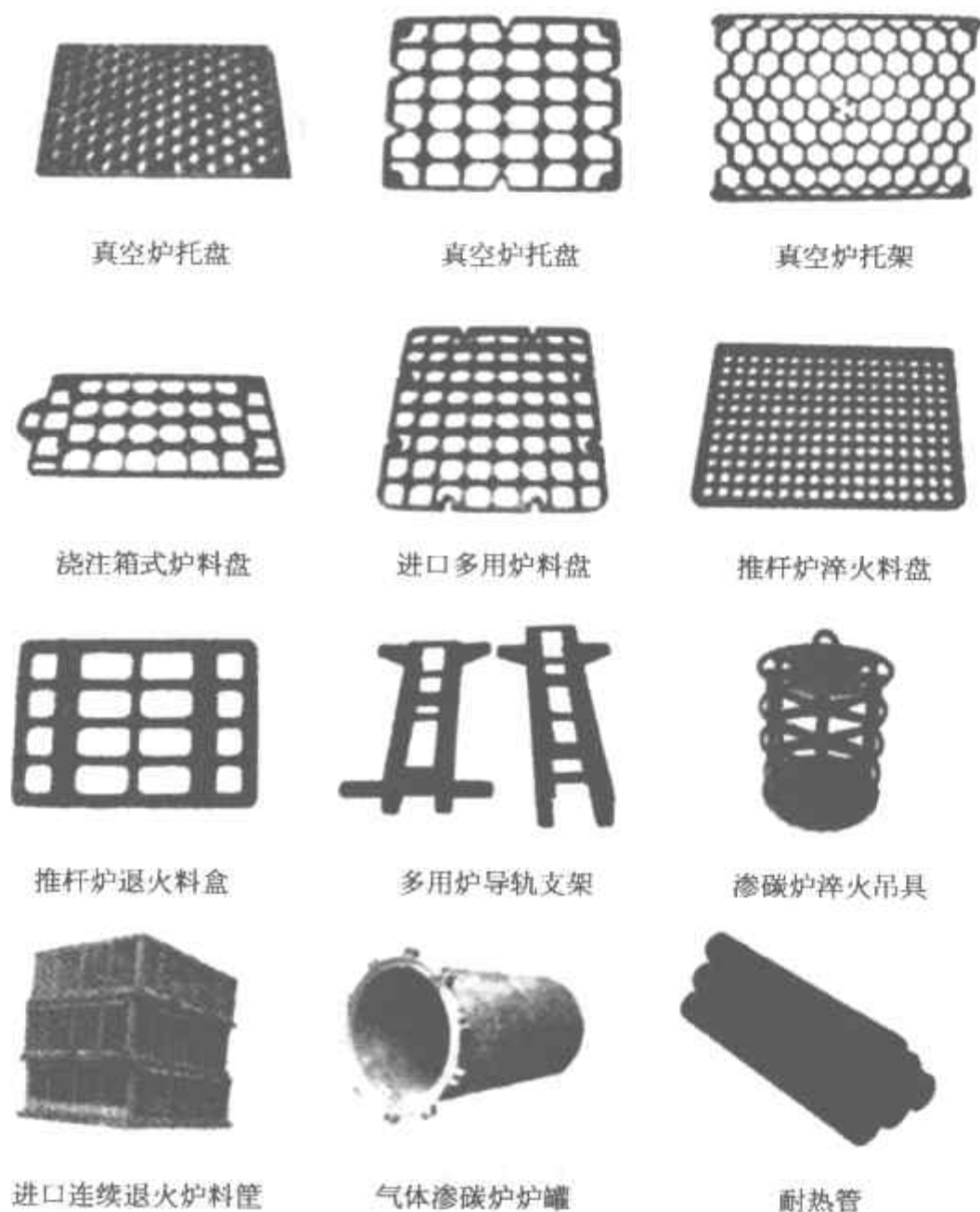


图 9-30 真空炉、多用炉推杆炉料盘和辅件

## 1. 盐浴炉工装夹具用材料(表 9-71)

表 9-71 盐浴炉零件及夹具推荐使用材料

工艺和温度范围	电 极	坩 埚	热电偶保护管	夹 具
盐浴淬火冷却炉 (205~400℃)	低碳钢	低碳钢	低碳钢, Cr25Ti	低碳钢
回火炉 (400~675℃)	低碳钢, Cr25Ti, Ni35Cr18 <sup>①</sup>	渗铝低碳钢, Ni35Cr18 <sup>①</sup>	渗铝低碳钢, Cr25Ti	低碳钢, Cr25Ti, Ni35Cr18 <sup>①</sup>
中性盐浴淬火加热炉 (675~870℃)	Cr25Ti, Ni35Cr18 <sup>①</sup>	Ni35Cr18 <sup>①</sup> , Cr17Ni35, Cr19Ni39, 陶瓷, Inconel	Cr25Ti, Ni35Cr18 <sup>①</sup>	Cr25Ti, 低碳钢
渗碳炉 (870~940℃)	Cr25Ti Ni35Cr18 <sup>①</sup>	低碳钢 <sup>②</sup> Ni35Cr18 <sup>①</sup> , Cr17Ni35	Cr25Ti, Ni35Cr18 <sup>①</sup>	Cr25Ti, Ni35Cr18 <sup>①</sup>
工具钢淬火加热炉 (1 010~1 315℃)	低碳钢 <sup>③</sup> , Cr25Ti	陶 瓷	Cr25Ti, Ni35Cr18 <sup>①</sup> 陶瓷	低碳钢

注：① 包括 30%~40%Ni 和 15%~23%Cr 系列合金。

② 只用于插入式盐浴炉。

③ 用于埋入式电极盐浴炉。

## 2. 热处理夹具和料盘用钢

热处理夹具和料盘用耐热钢见表 9-72, 炉板、炉罐、料盘、料筐、托架、导轨用耐热钢钢种见表 9-73。

表 9-72 热处理夹具和料盘用耐热钢

材料牌号	化学成分 (质量分数, %)				在氧化气氛 中最高工作 温度(°C)	不同温度(°C)下 10 000 h 断裂应力值(MPa)						在 20°C 时弯曲 强度 (MPa)	弹性 极限 (MPa)	拉伸强度 (MPa)
	C	Cr	Ni	其他		600	700	800	900	1 100	1 200			
20Cr13	0.25	13	—	2Si	900	29	8.8	3	1.2			638		
16Cr23Ni13	0.20	25	15	1.8Si	1 150	—	—	22.5	10	5	1.2	735		
20Cr25Ni20	0.20	25	20	1.8Si	1 150	—	—	26	13	6	1.5	735		
22Cr21Ni12N	0.20	20	15	1.8Si	1 000	98	44	20	9	4		735		
Y12Cr13	0.12	13	—	1S+1Al	950	35	10	4	1.5				343	540~680
Y12Cr18Ni9	0.15	18	9	1Si	800	100	30	15	—				265	540~735
6Cr20Ni14Si2	<0.2	20	12	2Si	1 050	100	45	20	9	4	1.5		294	580~735
16Cr25Ni20Si2	<0.2	25	20	2Si	1 200	—	—	20	9	4	1.5		294	580~735

注: 铸钢有 20Cr25Ni20、Cr20Ni15Si2, 轧钢、锻钢有 Y12Cr13、Y12Cr18Ni9、Cr25Ni20Si2。

表 9-73 炉板、炉罐、料盘、料筐、托架、导轨用耐热钢钢种

序号	项目	耐热铸钢钢种	序号	项目	耐热铸钢钢种
1		ZG 4Cr9Si2	9		ZG 3Cr31Ni1N(Cr-Ni-N)
2		ZG 1Cr18Ni9Ti	10		ZG 3Cr24Ni7SiN
3		ZG 2Cr24Ni7Si2	11		ZG 4Cr25Ni35Si2
4		ZG 2Cr20Ni14Si2	12		ZG 4Cr25Ni20(HK-40)
5		ZG 2Cr25Ni20Si2	13		ZG 3Cr24Ni7SiNRe
6		ZG 4Cr25Ni20Si2	14		ZG 4Cr28Ni48W5Si2
7		ZG 3Cr18Mn12Si2N(Cr-Mn-N)	15		ZG 3Cr25Ni45W5
8		ZG 3Cr22Mn4Ni4Si2N(R45)			

## 3. 渗碳和碳氮共渗炉用零件与夹具材料

渗碳和碳氮共渗炉用零件和夹具推荐使用材料见表 9-74。对于一定零件和使用温度下推荐一种以上材料, 每一种材料在使用中都证明是满意的, 表中按含合金量增加顺序列入多种选择。

表 9-74 渗碳和碳氮共渗炉用零件和夹具推荐使用材料

零件	使用温度 <sup>②</sup>		零件	使用温度 <sup>②</sup>	
	锻制	铸造		锻制	铸造
罐 <sup>①</sup>	—	Cr26Ni20	辐射管 <sup>①</sup>	Ni35Cr18 <sup>③</sup>	Cr17Ni35
	Ni35Cr18 <sup>③</sup>			Cr20Ni60	Cr19Ni39Si2
	Cr20Ni60				Cr17Ni65
马弗 <sup>①</sup>	Ni35Cr18 <sup>③</sup>	Cr17Ni35	结构件	Ni35Cr18 <sup>③</sup>	Cr17Ni35
	Cr20Ni60			Cr20Ni60	



(续表)

零件	工作使用温度 <sup>②</sup>		零件	工作使用温度 <sup>②</sup>	
	锻制	铸造		锻制	铸造
凸台盖板, 轨道	Ni35Cr18 <sup>③</sup>	Cr17Ni35	料盘、料筐、 夹具(不淬火)	Cr20Ni60	Cr19Ni39Si2
	Cr20Ni60				Cr19Ni39Si2Nb
管子支撑	Ni35Cr18 <sup>③</sup>	Cr17Ni35	料盘、料筐、 夹具(油淬)	Ni35Cr18 <sup>③</sup>	Cr17Ni35
	Cr20Ni60				Cr17Ni35Nb
料盘、料筐、 夹具(不淬火)	Ni35Cr18 <sup>③</sup>	Cr17Ni35	Cr20Ni60	Cr20Ni60	Cr19Ni39Si2
	Cr20Ni60				Cr19Ni39Si2Nb
	Ni35Cr18 <sup>③</sup>	Cr17Ni35Nb			Cr12Ni60Si2

注: ① 对于罐、马弗和辐射管, 在热源和工作区之间的温度梯度为 40~95℃。

② 815~1010℃。

③ 包括普通 Ni35Cr15 型或其改进型  $w_{Ni} 30\% \sim 40\%$  和  $w_{Cr} 15\% \sim 23\%$  的一系列合金, 也包括 RA-330、35-19、Incoloy 及其他类合金。

#### 4. 热处理炉组件和夹具材料

淬火、退火、正火、钎焊和去应力的炉子组件和夹具推荐的材料见表 9-75。

表 9-75 淬火、退火、正火、钎焊和去应力的炉子组件和夹具推荐的材料

温度范围 (℃)	转筒、马弗 <sup>①</sup>		辐射管 <sup>①</sup>		网眼输送带	链条、链轮、辊子轨道、料盘			
	锻造	铸造	锻造	铸造	锻造	锻造	铸造	锻造	铸造
595~675	1Cr17	Cr21Ni12	Cr17MnSi	Cr21Ni12	1Cr17	1Cr17	Cr21Ni12	1Cr17	Cr21Ni12
	0Cr18Ni9		0Cr18Ni9		0Cr18Ni9	0Cr18Ni9		Cr25Ti	
675~766	0Cr18Ni9	Cr21Ni12	1Cr18Ni11Nb	Cr21Ni12	Cr18Ni35	Cr18Ni35	Cr21Ni12	0Cr18Ni9	Cr21Ni12
	1Cr18Ni11Nb	Cr26Ni14	Cr18Ni35	Cr26Ni14			Cr26Ni14	Cr17Ni12Mo	Cr26Ni14
	Cr18Ni35 <sup>②</sup>							Cr18Ni35	
760~925	Cr25Ni20Si2	Cr26Ni14	Cr25Ni20Si2 <sup>③</sup>	Cr26Ni14	Cr24Ni20Si2	Cr24Ni20Si2	Cr26Ni14	Cr25Ni20Si2	Cr26Ni14
	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Cr17Ni35 <sup>⑤</sup>	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Cr26Ni20	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Cr30Ni20	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Cr26Ni20
	Cr20Ni60	HW <sup>⑥</sup>	Cr20Ni60	Cr30Ni20			Cr17Ni35		Cr30Ni20 Cr17Ni35
925~1010	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Cr26Ni20	Cr20Ni60	Cr26Ni20	Cr24Ni20Si2	Cr24Ni20Si2	Cr30Ni20	Cr25Ni20Si2	Cr30Ni20
	Cr20Ni60	Cr17Ni35		Cr30Ni20	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Cr17Ni35	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Cr17Ni35
		Cr12Ni60		Cr17Ni35	Cr20Ni60	Cr20Ni60		Cr20Ni60	
1010~1095	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Cr26Ni20	Cr20Ni60	Cr30Ni20	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Cr30Ni20	35~18 <sup>④</sup>	Cr30Ni20
		Cr30Ni20		Cr17Ni65	80~20	80~20	Cr17Ni35	Cr20Ni60	Cr17Ni65
1095~1205	HastelloyX	Cr28Ni15	Cr20Ni60	Cr30Ni20	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Ni35Cr18 <sup>④</sup>	Cr17Ni65	Cr20Ni60	Cr30Ni20
	Cr20Ni60	Cr19Ni39Si2 Cr17Ni65		Cr17Ni65	Ni80Cr20	Ni80Cr20			Cr17Ni65

注: ① 假定在转筒、马弗和辐射管的热源侧和工作区侧的温度梯度为 40~95℃。

② 在机械振动或热冲击下应用推荐稳定级 3095。

③ 只推荐用于立式安装下。

④ 一般为 Ni35Cr15 型合金系列, 或其改进型, 包括  $w_{Ni} 30\% \sim 40\%$  和  $w_{Cr} 15\% \sim 23\%$ , 以及 RA-330、35-19、Incoloy 和其他专利合金。

⑤ 要求高强度时推荐 HK 或 HL。

⑥ 推荐用于要求抗振下, 如振底。

## 二、起重运输机械

热处理在生产作业过程中往往离不开起重运输机械的配合。常用的起重运输机械有电动葫芦、梁式起重机、桥式起重机、内燃叉车及手动液压叉车等。标准的起重运输机械各生产厂都提供产品样本和技术资料,各工厂可根据工作条件进行选购。适用热处理大件或长轴类零件淬火的起重机吊钩下降速度应达 20~60 m/min,而且备有专用松闸机构,可手动操作使之下落,以保工件淬火质量和避免油面起火。

## 三、喷砂机

喷砂机是利用压缩空气的压力将砂子喷吹到工件表面实行清理的设备。喷砂机有干式喷砂机和液体喷砂机两类,如按工作原理来分则有吸入式、重力式和压出式三种。

### 1. 干式喷砂机

干式喷砂机通常由喷砂枪、压缩空气管、输砂管、储砂室、喷砂室、工件回转台(或筒)、砂尘分离装置及除尘装置组成。按被加工工件的摆放形式来分,干式喷砂机有手动喷砂机、转台喷砂机、滚筒式喷砂机及往复式喷砂机。手动式喷砂机适用于单件或形状复杂工件的喷砂;滚筒式喷砂机适用于小型批量工件的喷砂;转台式喷砂机适用于较大工件或批量工件喷砂;往复式适用于杆状零件的喷砂。干式喷砂机喷砂效率高,但易产生粉尘飞扬,危害健康,必须加强管理。

干式喷砂机采用布袋除尘器和滤芯式除尘器来吸除喷砂时产生的粉尘。滤芯除尘器的效果优于布袋除尘器,除尘效率达 99.9%。

### 2. 液体喷砂机

液体喷砂机不会产生粉尘污染,零件清理后表面细洁。但清理效率不如干式喷砂机。表 9-76 是液体喷砂机的主要技术参数。

表 9-76 液体喷砂机的主要技术参数

项 目	SS1 型	SS2 型	SS5 型	SS5-A 型(半自动)
磨液泵功率(kW)	4.0	1.5	2×4	2×4
工作台转盘电动机功率(kW)			0.75	0.75
磨料粒度	46 号以上	46 号以上	46 号以上	46 号以上
喷嘴直径(mm)	10~12	8~10	10~12	10~12
压缩空气耗量(m <sup>3</sup> /min)	1~1.5	1.0	4~6	6~9
喷枪数量(把)	1	1	4	6
压缩空气压力(kPa)	400~600	400~600	400~600	400~600
分离器水泵功率(kW)	0.4		0.4	0.4
工作台直径(mm)	600	500	1 250	1 250
工作室门尺寸(mm×mm)	670×490		1 250×1 250	1 250×1 250
整机外形尺寸(mm×mm×mm)	2 200×2 200×2 400	905×1 020×1 520	3 500×2 900×2 900	3 500×2 900×2 900
整机质量(kg)	470		1 500	1 500

## 第四节 热工仪表

热工仪表是热处理温度检测控制系统的重要组成部分,是正确地执行热处理工艺和确保热处理质量的重

要装置。温度控制系统主要有传感器、温度显示调节控制仪表(调节器)及执行器三大部分组成。

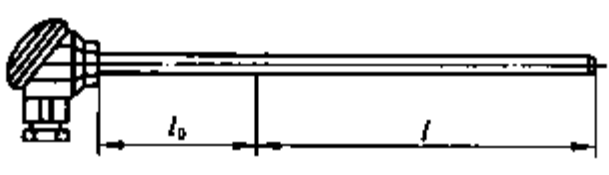

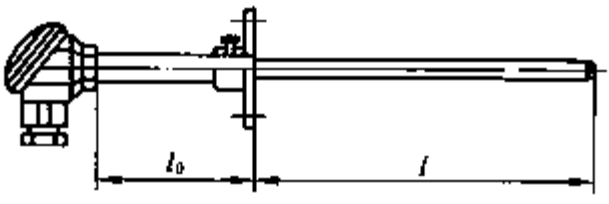
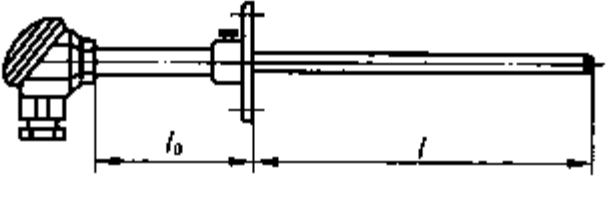
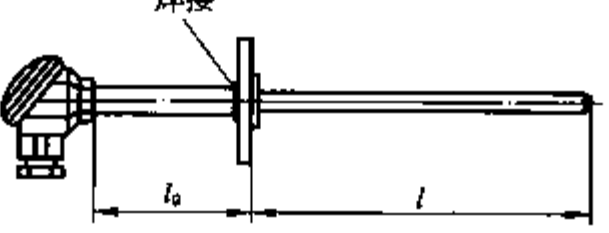
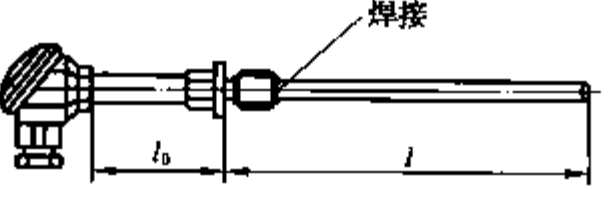
### 一、传感器(温度测量元件)与温度计

传感器主要有热电偶、热电阻、辐射感温器等,其中以热电偶使用较为广泛。温度计有光学高温计、光电高温计、红外测温仪和水银温度计等。

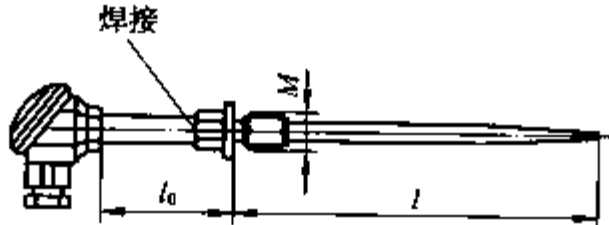
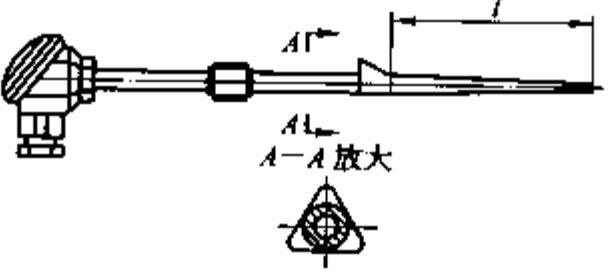
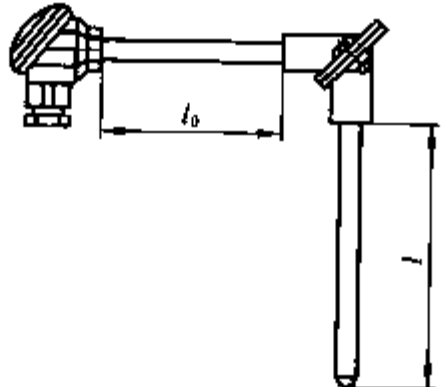
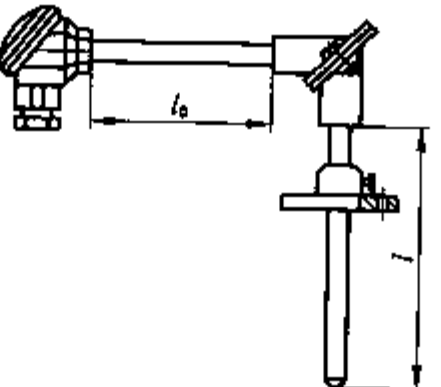
#### 1. 热电偶及补偿导线

1) 常用热电偶 常用的热电偶结构形式有普通直形、直形带活动法兰、直形非固定螺纹、直角尺形带活动法兰和锥形带固定螺纹等数种。表 9-77 为热电偶的结构形式与特点;表 9-78 为常用热电偶技术数据。

表 9-77 热电偶的结构形式及特点

保护管形状	固定装置形式	结构特点及用途	结构示意图
直形	无固定装置	保护管可以用金属或非金属两种。适用于常压设备及需要移动的或临时性的温度测量场所	
		插入部分 $l$ 为非金属保护管,不插入部分 $l_0$ 为金属加固管。用途同上	
	可动法兰带加固管	带可动法兰装置,使用时法兰是固定在金属加固管 $l_0$ 上,插入部分为非金属保护管。适用于常压设备及需要移动的或临时性的温度测量场所	
	可动法兰	金属保护管带可动法兰。适用于常压设备,插入深度 $l$ 可以移动调节	
	固定法兰	金属保护管带固定法兰,这种固定方法装拆方便,可耐一定压力(0~6.3 MPa)。适用于有一定压力的静流或流速很小的液体、气体或蒸汽等介质的温度测量	
	固定螺纹	金属保护管带固定螺纹,特点和用途同上	

(续表)

保护管形状	固定装置形式	结构特点及用途	结构示意图
锥形	固定螺纹	锥形金属保护管带固定螺纹,耐压力 19.6 MPa,可承受液体、气体或蒸汽流速 80 m/s。适用于有压力和流速的介质测温	
形	焊接	锥形焊接金属保护管耐压 29.4 MPa,可承受液体、气体或蒸汽流速 80 m/s。适用于主蒸汽管道	
直角	直角弯形	直角弯形金属保护管,横管长度 $l_0$ 为 500 mm 和 750 mm,适用于常压、不能从设备的侧面开孔且顶上辐射热很高的设备中,例如测量装有液体的加热炉的温度	
形	可动法兰	直角弯形金属保护管,横管长度 $l_0$ 为 500 mm 和 750 mm 两种,适用于常压、不能从设备的侧面开孔且顶上辐射热很高的设备中,例如测量装有液体或其他原因必须在顶上测量温度的设备。带有可动法兰作为固定装置,插入深度可根据需要进行移动调节	

注:  $l_0$  为非插入部分;  $l$  为插入部分。

表 9-78 常用热电偶技术数据

热电偶名称	分度号		热电极材料			100℃时电势(mV)	使用温度(℃)		允许误差(℃)			主要特点
	新	旧	极性	识别	化学成分(质量分数)		长期	短期	温度范围	级别	允 差	
铂铑 <sub>10</sub> -铂	S	LB-3	正	亮白,较硬	Pt90%,Rh10%	0.645	1300	1600	0~1600	I	±1 或 ±[1+(T-1100)×0.003]	高温下抗氧化性好,宜在氧化或中性气氛中使用,不宜在还原气氛中使用
			负	亮白,柔软	Pt100%					II	±1.5 或 ±0.25%T	
铂铑 <sub>13</sub> -铂	R		正	较硬	Pt87%,Rh13%		1300	1600	0~1600	I	±1 或 ±[1+(T-1100)×0.003]	
			负	柔软	Pt100%					II	±1.5 或 ±0.25%T	
铂铑 <sub>30</sub> -铂铑 <sub>6</sub>	B	LL-2	正	较硬	Pt70%,Rh30%	0.033	1600	1800	600~1700	II	±0.25%T 或 1.5	除上述外,冷端在40℃以下不用修正
			负	稍软	Pt94%,Rh6%					III	±4 或 ±0.5%T	
镍铬-镍硅 (镍铬-镍铝)	K	EU-2	正	暗绿,不亲磁	Cr9% ~ 10%, Si0.4%, Ni90%	4.095	1200	1300	-40~+1000 -40~+1200 -200~+40	I	±1.5 或 ±0.4%T	宜在氧化、中性气氛及真空中使用
			负	深灰,稍亲磁	Si2.5% ~ 3.0%, Ni97%, Co≤0.6%					II	±2.5 或 ±0.75%T	
铜-康铜	T	CK	正	褐红色	Cu100%	4.277	350	400	-40~+350 -40~+350	I	±0.5 或 ±0.4%T	适用于氧化\还原气氛及真空,在氧化气氛中不宜超过300℃,在-200~0℃温度下稳定性很好
			负	亮黄	Ni45%,Cu55%					II	±1.0 或 ±0.75%T	
铁-康铜	J		正	蓝黑,亲磁	Fe100%	5.268	600	750	-40~+750	I	±1.5 或 ±0.4%T	适用于氧化、还原气氛及真空,在氧化气氛中不宜超过500℃
			负	亮黄,不亲磁	Cu40%~60%合金					II	±2.5 或 ±0.75%T	
镍铬-康铜	E		正	暗绿	Cr9% ~ 10%, Si0.4%, Ni90%	6.317	750	850	-40~+800 -40~+900	I	±1.5 或 ±0.4%T	适用于-200~800℃的氧化或中性气氛,不适用于还原气氛
			负	亮黄	Cu40%~60%合金					II	±2.5 或 ±0.75%T	
镍铬-考铜	EA-2	EA-2	正	暗绿色,较暗	Cr9% ~ 10%, Si0.4%, Ni90%	6.95	600	800	0~600	工业	±4 或 ±1%T	已少用
			负	亮黄	Cu56%~57%, Ni43%~44%							

2) 铠装热电偶 铠装热电偶的测量端的结构形式见表 9-79; 铠装热电偶的使用温度见表 9-80。

表 9-79 铠装热电偶测量端的结构形式


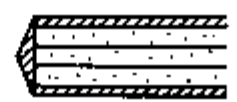

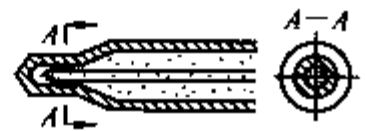
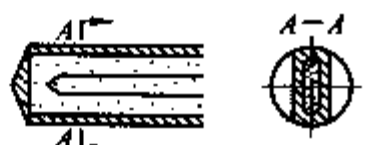
测量端形式	特点	用途	示意图
露端型	1) 结构简单 2) 时间常数小, 反应快 3) 偶丝与被测介质接触, 使用寿命短	适于温度不高、要求反应速度快、对热电偶不产生腐蚀作用的介质	
接壳型	1) 时间常数较露端型大 2) 偶丝不受被测介质腐蚀, 寿命较露端型长	适于测量温度较高、要求反应速度较快、压力较高并有一定腐蚀性的介质	
绝缘型	1) 时间常数较上述均大 2) 偶丝与金属套管绝缘, 不与被测介质接触, 寿命长	适于测量温度高、压力高及腐蚀性较强的介质, 尤其适于对电绝缘性较好的生产设备	
圆变截面型(可制成接壳或绝缘型)	套管端头部分的直径为原直径的 1/2。时间常数更小	适于要求反应速度快、有较大机械强度或安装孔较小的温度测量设备	
扁变截面型(可制成接壳或绝缘型)	反应速度更快	适于安装孔为扁形的温度测量设备	

表 9-80 铠装热电偶的使用温度

金属套管材料	外 径(mm)							
	φ1.0	φ1.5	φ2.0	φ3.0	φ4.0	φ5.0	φ6.0	φ8.0
	使 用 温 度(°C)							
铜(H62)	200	250	300	300	350	350	400	400
不锈钢(1Cr18Ni9Ti)	500	500	550	600	600	700	700	800
不锈钢(1Cr18Ni9Nb)	600	650	700	700	800	800	900	900
高温合金(Cr25Ni20)	650	700	750	800	900	950	1 000	1 000
镍基高温合金(GH3030)	700	800	850	900	1 000	1 100	1 100	1 150
镍基高温合金(GH3039)	850	900	1 000	1 100	1 100	1 150	1 200	1 200

注: 铠装热电偶的使用温度不仅与金属套管的材料及直径有关, 也与偶丝种类有关。表中数据仅指常用金属套管镍铬-镍硅铠装热电偶的使用温度。

3) 热电偶保护套管 常用的保护套管有金属保护管、非金属保护管两种。金属保护管使用温度见表 9-81; 非金属保护管使用温度见表 9-82; 瓷保护管直径和长度规格见表 9-83。

表 9-81 金属保护管使用温度

金属保护管	使用温度(°C)	金属保护管	使用温度(°C)	金属保护管	使用温度(°C)
06Cr19Ni9	850	022Cr17Ni14Mo2	850	GH3030	1 100
022Cr19Ni10	850	1Cr18Ni9Ti <sup>①</sup>	850	GH3039	1 200
06Cr18Ni12Mo2Ti	850	06Cr25Ni20	1 000	GH455	1 300

注: ① 为原材料牌号。

表 9-82 非金属保护管使用温度

非金属保护管	使用温度(°C)	非金属保护管	使用温度(°C)	非金属保护管	使用温度(°C)
刚 玉	1 600	碳化硅	1 650	聚四氟乙烯	200
高 铝	1 300	石 英	1 000		

表 9-83 瓷保护管直径和长度规格表

φ16(单层管)(mm)		φ20(单层管)(mm)		φ25(单层管)(mm)		φ16(单层管)(mm)		φ20(单层管)(mm)		φ25(单层管)(mm)	
L	I	L	I	L	I	L	I	L	I	L	I
300	150					650	500	650	500	650	500
350	200					900	750	900	750	900	750
400	250	400	250			1 150	1 000	1 150	1 000	1 150	1 000
450	300	450	300			1 650	1 500	1 650	1 500	1 650	1 500
550	400	550	400	550	400	2 150	2 000			2 150	2 000

4) 补偿导线 补偿导线的型号、色别及允差见表 9-84; 补偿导线的规格见表 9-85。

表 9-84 补偿导线的型号、色别及允差

型 号	配用 热电偶	极 性			允 差									
					100°C(一般用)				200°C(耐热用)					
		极 性	电 极 材 料	色 别	热 电 势 (mV)	允 差				热 电 势 (mV)	允 差			
						普通级		精密级			普通级		精密级	
				mV	°C	mV	°C	mV	°C	mV	°C			
SC	铂铑 <sub>10</sub> -铂	正	SPC	红	0.645	±0.037	5	±0.023	3	1.440	±0.037	5	—	—
		负	SNC	绿										
KC	镍铬-镍硅	正	KPC	红	4.095	±0.105	2.5	±0.063	1.5	—	—	—	—	—
		负	KNC	蓝										

(续表)

型号	配用热电偶	极 性			允 差									
		极 性	电 极 材 料	色 别	100℃(一般用)					200℃(耐热用)				
					热电势 (mV)	允 差				热电势 (mV)	允 差			
						普通级		精密级			普通级		精密级	
mV	℃	mV	℃	mV	℃	mV	℃	mV	℃					
KX	镍铬-镍硅	正	KPX	红	4.095	±0.105	2.5	±0.063	1.5	8.137	±0.100	2.5	±0.060	1.5
		负	KNX	黑										
EX	镍铬-康铜	正	EPX	红	6.317	±0.170	2.5	±0.102	1.5	13.419	±0.183	2.5	±0.111	1.5
		负	ENX	棕										
JX	铁-康铜	正	JPX	红	5.268	±0.135	2.5	±0.081	1.5	10.777	±0.138	2.5	±0.083	1.5
		负	JNX	紫										
TX	铜-康铜	正	TPX	红	4.277	±0.047	1	±0.023	0.5	9.266	±0.053	1	±0.027	0.5
		负	TNX	白										
RC	铂铑 <sub>10</sub> -铂	正	RPC		0.647					1.468				
		负	RNC											

表 9-85 补偿导线的规格

温度等级	线芯种类	股数	单线直径 (mm)	标称截面积 (mm <sup>2</sup> )	绝缘厚度 (mm)	护套厚度 (mm)	最大外径(mm)	
							单股线芯	多股线芯
80~100℃	单股线芯	1	0.8	0.5	0.5	0.8	3.7×6.4	3.9×6.6
		1	1.13	1.0	0.7	1.0	5.0×7.7	5.1×8.0
		1	1.37	1.5	0.7	1.0	5.2×8.3	5.5×8.7
		1	1.76	2.5	0.7	1.0	5.7×9.2	5.9×9.7
150℃	软型线芯	7	0.3	0.5	0.5	0.3	2.6×4.6	2.8×4.8
		7	0.43	1.0	0.5	0.3	3.0×5.3	3.1×5.6
		7	0.52	1.5	0.5	0.3	3.2×5.8	3.4×6.2
		19	0.41	2.5	0.5	0.3	3.6×6.7	4.0×7.3

## 2. 热电阻

热电阻是根据其电阻随温度变化的原理来测温的传感器,它通过与显示仪、记录仪、调节仪等配套形成温度测量控制系统。常用的热电阻有:铂热电阻、铜热电阻、镍热电阻、铱铁热电阻及钨热电阻等,可制成装配式热电阻与铠装热电阻,使用温度范围为-200~600℃。热电阻主要用于热处理的冷处理设备、低温烘箱、液体介质、气体介质和固体表面的测温,其测量精度高,稳定性好,但热响应速度较慢。工业用热电阻的品种及测温范围见表 9-86; WZ 系列热电阻主要技术参数见表 9-87。





#### 4. 光学高温计

光学高温计是以灯丝的辐射亮度与被测物体的辐射亮度作比较来测量温度的。灯丝亮度所对应的温度也是以绝对黑体作分度的,进行温度测量时必须用该物体的单色黑度作一定的修正。光学高温计常用于高温盐浴炉、感应加热工件等表面温度的测量,但是温度测量误差较大。表 9-89 为灯丝隐灭式光学高温计的型号与规格。

表 9-89 灯丝隐灭式光学高温计的型号与规格

型 号	测量范围(°C)	量程号	吸收玻璃旋钮位置	允许基本误差(°C)		测量线路类型
WGG2-201	700~2 000	1	15	700~800	±33	电压式
				800~1 500	±22	
		2	20	1 200~2 000	±30	
WGJ2-202	800~2 000	1	1	800~1 500	±8	电桥式
		2	2	1 200~2 000	±13	
WGG2-202	700~2 000	1	15	700~1 500	±13	电桥式
		2	20	1 200~2 000	±20	
WGG2-302	700~3 000	1	15	700~1 500	±13	电桥式
		2	30	1 200~3 000	±47	
WGJ3-301 (非整体结构)	700~3 000	1	15	700~1 500	±13	电桥式
		2	20	1 200~2 000	±20	
		3	30	1 600~3 000	±47	

#### 5. 光电高温计

光电高温计是利用光电转换元件来测量温度的,灵敏度高,但测量精度不高。国产的光电高温计的主要技术规格见表 9-90。

表 9-90 光电高温计的主要规格

名称和型号	测量范围(°C)	距离系数	光敏元件	附加调节形式
WDL-2 型光电高温计	700~1 300, 1 100~2 000	1/40	硅光电池	
WDK 光电温度控制器	750~1 000, 900~1 200	1/10~1/15	硫化镉光敏电阻	二位电接点
WDH-1 型光电高温计	300~600, 400~700	1/30	硫化铅光敏电阻	
	700~1 000, 800~1 200 900~1 400, 1 000~1 500		硅光电池	
WDH-2 型光电高温计	100~250, 250~500	1/40	硫化铅光敏电阻	二位电接点、电动 PID
	400~800	1/90		
	700~1 100, 900~1 200 1 000~1 600	1/70 1/275	硅光电池	
YT-GD-1 型 光电测温控温仪	700~1 200, 800~1 300 900~1 400, 700~2 000	1/100	硅光电池	电动 PID ≥ ±1.5 V

#### 6. 红外光电高温计

红外光电高温计是将被测物体发出的红外辐射能量转变成电信号经放大后传输给温度检测元件和显示仪表的温度测量装置。

1) Q 系列和 R 系列光电高温计 这是国内常用的两类光电高温计。它们与信号处理单元及相应的附件配套可进行高温温度的自动控制。表 9-91 是 Q 系列和 R 系列红外探测器及配套控制器的主要技术参数。

表 9-91 Q 系列 R 系列红外探测器及配套控制器主要技术参数

红外探测器型号	配套控制器型号	测温范围 (°C)	分度号	透镜孔径 (mm)	聚焦距离 (mm)	视场角弧度 (rad)	工作波段 ( $\mu\text{m}$ )	125 mm 变型的最 小目标尺寸(mm)	检测精度 (%)	达到 98% 时 响应时间
QQM4/7.5C35P450X	ZM-QM4/7.5C	400~750	Q200C		450	1/12		10		
QQM5/9C35P600				35	600	1/18		7		
NQM5/9C35P1200	ZM-QM5/9C	500~900	Q201C		1 200	1/32	0.7~1.1	4		
LQM5/9C18P250				18	250	1/14		10		
QQO6/11C35P1200				35		1/32		4		
NQO6/11C16P1200X	ZM-QO6/11C	600~1 100	Q202C	16	1 200	1/65		1.7		
LQO6/11C18P600				18	600	1/33		4		
QQO7/13C22P1200				22		1/50		2.5		
NQO7/13C10P1200X	ZM-QO7/13C	700~1 300	Q203C	10	1 200	1/85		1		
LQO7/13C12P600				12	600	1/50		3		
QQO8/15C18P1200				18		1/65		2		
NQO8/15C8P1200X	ZM-QO8/15C	800~1 500	Q204C	8	1 200	1/100		0.8		5 ms
LQO8/15C9P600				9	600	1/66		2.5		
QQO9/18C11P1200				11		1/85		1.2		
NQO9/18C5P1200X	ZM-QO9/18C	900~1 800	Q205C	5	1 200	1/180	0.5~1.1	0.5	0.6	
LQO9/18C6P600				6	600	1/100		1.5		
QQO10/20C9P1200				9		1/125		0.9		
NQO10/20C4P1200X	ZM-QO10/20C	1 000~2 000	Q206C	4	1 200	1/210		0.4		
LQO10/20C5P600				5	600	1/120		1.5		
QQO15/25C7P1200				7		1/160		0.7		
NQO15/25C3P1200X	ZM-QO15/25C	1 500~2 500	Q207C	3	1 200	1/250		0.3		
LQO15/25C4P600				4	600	1/150		1		
QQO10/1735P1200	ZM-QO10/17C	100~1 700	Q255C		1 200	1/32	0.4~0.6	4		
O-R-GLO/3C35P75	ZM-GL0/3C	0~300	R200C		75	1/2	0.7~1.2	64		
N-R06/16C35P600	ZM-RO6/16C	600~1 600	R201C	35			0.4~2.8	9		2 S
N-R-GG4/12C35P600	ZM-RGG4/12C		R202C				4.3~8	37		
N-R-GU4/12C35P600	ZM-RGU4/12C	400~1 200	R203C		600	1/15	2.7~4.7			
N-R-GN3/6C35P600	ZM-RGV3/6C	300~600	R204C				2.7~8	35	0.8	

2) Raytek 红外测温仪 这是一种非接触红外测温仪, Raytek 智能传感头带有数字电路和双向通讯, 可在控制室内对传感头进行远程参数设置使温度测控更趋准确, 但价格较高, 且用于盐浴炉将受烟气干扰, 会影响测温正确度。表 9-92 是 Raytek 红外测温仪型号及性能参数。

表 9-92 Raytek 各类红外测温仪型号及性能参数

	系列	产品型号	测量范围(°C)	距离系数	光谱响应	精度
扫描式		MP501M	600~1 200	100:1 或 300:1	1.0 μm	测量值的±2%或±2°C
		MR1S	600~3 000(分段)	44~130:1	1.0 μm	满量程的±0.75%
固定式	Marathon	FR1	500~2 500(分段)	20~65:1	1.0 μm	±(测量值的 0.3%±1°C) <sup>①</sup>
		MA1S	500~3 000(分段)	80~300:1	1.0 μm	±(测量值的 0.3%±1°C) <sup>①</sup>
		MA2S	250~2 000(分段)	80~300:1	1.6 μm	
		TX	TXLT	-18~500	33:1	8~14 μm
		TXMT	200~1 000	33:1	3.9 μm	
	TXHT	500~2 000	60:1	2.2 μm		
便捷式	3i	3i1M	600~3 000	180:1	1.0 μm	测量值的±0.5%或±1°C
		3i2M	200~1 800	90:1	1.6 μm	测量值的±1%或±1°C
		3iLT	-30~1 200	75:1	8~14 μm	测量值的±1%或±1°C
		3iLR	-30~1 200	120:1	8~14 μm	测量值的±1%或±1°C
	MX	MX2/4/4+	-30~900	60:1	8~14 μm	测量值的±1%或±1°C

注: ① 表示读数为绝对温度。

## 二、温度显示与调节仪表

热处理生产中常用的温度与调节仪表类型和特性见表 9-93。

表 9-93 常用显示仪表的类型和特性

类别	结构形式		主要功能	型号	
模拟量 显示仪表	动圈式	指示仪	单针指示	XCZ	
		调节仪	二位调节、三位调节、时间比例调节、电流 PID 调节、时间程序调节	XCT	
	自动 平衡式	电子电位差计		单针指示或记录、双笔记录或指示多点 打印记录或指示 带电动调节、带气动调节、旋转刻度指示、色带指示	XW
		电子平衡电桥	直流		XQ
			交流		XD
	电子差动仪				
数字量 显示仪表	数字式	显示仪	用数字显示被测温度等物理量	XMZ	
		显示调节仪	显示、位式调节和报警	XMT	
	图像字 符显示	数字式	人一机联系装置	CRT	
		视频式			

### 1. 动圈式温度指示调节仪

动圈式温度指示调节仪有毫伏计式(配热电偶)和不平衡电桥(配热电阻)两类, 在热处理生产中应用较多。动圈式仪表的型号命名及意义见表 9-94。

表 9-94 动圈式仪表型号的代号及意义

第 一 节			第 二 节			注 意 事 项						
第一位	第二位	第三位	第一位	第二位	第三位							
代号	意义	代号	意义	代号	意义							
X	显示 仪表	C	动圈式 (磁电式)	Z	指示仪	1	单标尺	0		1	配热电偶	配热电偶时： 需调整仪表机 械零位以修正热 电偶参比端温度 时对仪表的 示值； 外接电阻值为 15 Ω，不足时应 改变外线调整电 阻使之符合。 配电阻时： 应根据仪表接 线方式调整出厂 时附带的三支 5 Ω外线调整电 阻达到刻度盘上 的规定值
				T	指示 调节仪		表示设计序 列及种类		表示调节 功能：	2	配热电阻	
					1	高频振荡固 定参数	0	二位调节	3	配霍尔变 送器	3	配霍尔变 送器
					2	高频振荡可 变参数	1	三位调节 (狭带)	4	配压力变 送器	4	配压力变 送器
					3	带时间程序 高频振荡固定 参数	2	三位调节 (宽带)				
					5	带复合调节	3	时间比例 (脉冲式)				
							4	时间比例二 位调节				
							5	时间比例加 时间比例				
							8	比例调节 (连续)				
							9	比例积分微 分(连续输出 式)				

动圈式温度指示调节仪由磁电式表头、动圈测量机构及连接测量电路组成，XCT-101型仪表的基本结构见图9-31。工作时热电偶的热电势形成的电流通过动圈、永久磁场产生电磁力矩使指针偏转，而弹簧丝产生转矩，使两者相等，指针停留。指针偏转角正比于热电偶电势，指示出温度。当温度达到设定值时，指示针上带有的铝旗使 $L_3$ 电感减小，振荡器停振，继电器触点断开，加热停止，从而达到温度控制。

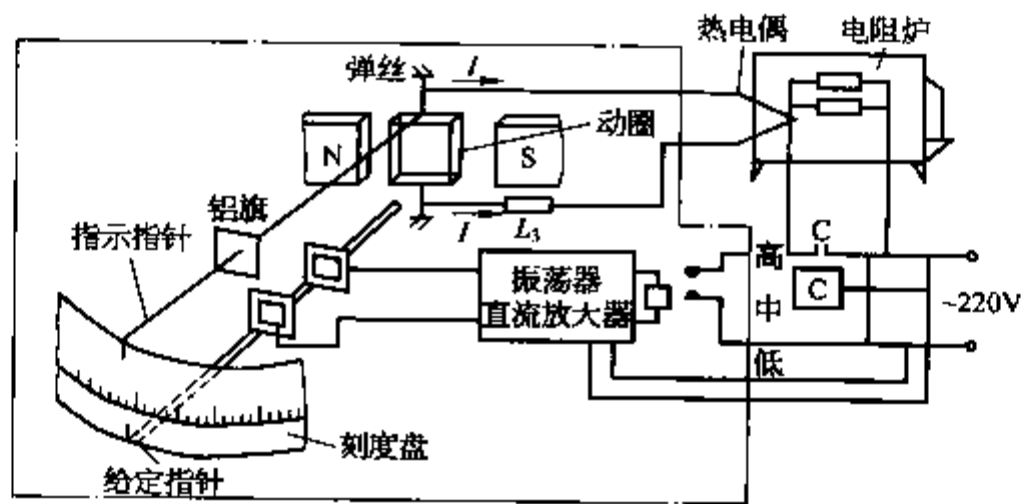


图 9-31 XCT-101 型仪表的基本结构示意图

## 2. 电子自动平衡式温度显示与调节仪表

热处理采用的自动平衡指示调节仪主要有 XWB、XWC、XWD 和 XQB、XQC、XQD 两种类型。XW 类为电子电位差计式配用热电偶。XQ 类为自动平衡电桥式，配用热电阻。自动平衡指示调节仪的代号及意义见表 9-95。

表 9-95 自动平衡显示仪表型号的代号及意义

第一节					第二节					尾注
第一位		第二位		第三位		第一位		第二、三位		
代号	意义	代号	意义	代号	意义	代号	意义	代号	意义	
X	显示仪表	W	直流电位差计	B	圆图记录仪	1	单指针、单笔	00	无附加装置	A: 快速 (0.5~1 s); B: 小信号 (< 10 mV, > 1 mV); AB: 快速小信号; Z: 电阻抗输入; G: 高阻抗输入
			Q		直流电桥		C		长图记录仪	
		L	交流电压平衡	D	小型长图记录仪	3	多点指示、多点记录	02	表内定值电接点报警器	
			D		交流电桥		E		小型圆标尺指示仪	
		C	电子秤	F	中型长图记录仪	5	单指针、单笔气动调节	04	量程扩展	
			G		中型圆图记录仪		05		量程扩展	
		H		旋转刻度仪	X	便携式仪表		07	自动变速	
			08	程序控制		09	积算装置		09	
		10		计数器	11		计算单元	11		
			11	计算单元		12	模数转换		12	
12	模数转换	13		电阻发信装置	13		电阻发信装置	14		多点任意定值与报警
	13		电阻发信装置	14		多点任意定值与报警	14		多点任意定值与报警	14
14		多点任意定值与报警	14		多点任意定值与报警	14		多点任意定值与报警	14	

1) 自动平衡指示调节仪工作原理 现举 XWB-101 型电子电位差计例子加以说明。图 9-32 是其工作原理示意图。此类自动平衡指示器调节仪是用测量桥路平衡补偿原理来调节显示和控制温度的。当热电偶产生的热电势与测量桥路比较时,产生差值即信号经振动变流器转换成交流电压,再经电压和功率放大器放大,推动可逆电动机转动,促使测量桥路趋向平衡,平衡后可逆电动机停止转动,可逆电动机带动的指示记录机构给出相应温度。炉温变化出现新的不平衡时,重复上述过程,可逆电动机立即转动,直到桥路平衡,于是指示和记录升高后的炉温。可逆电动机还同时带动调节机构工作。当炉温达到设定值时调节机构使微动开关断开,接触器触头脱离电炉停止供电。炉温低于给定值时,可逆电动机逆转,微动开关闭合,接触器接通,电炉供电升温。如此达到炉温控制。

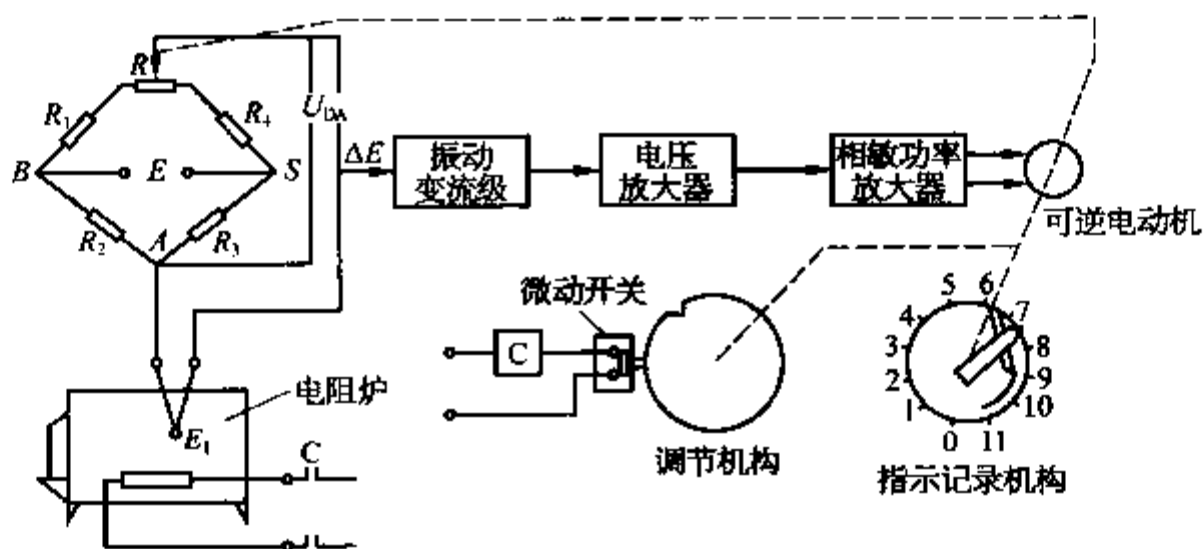


图 9-32 XWB-101 型电子电位差计工作原理示意图

2) 自动平衡式温度指示调节仪表的品种(表 9-96)

表 9-96 自动平衡式显示仪表的品种

名 称	类 别	形 式	特 点
小条形指示记录仪	XWJ XQJ	单针、双针、色带指示,单笔、 双笔记录	标尺长 100 mm,占仪表盘面积小
大条形指示仪	XWA XQA XDA	单针、双针和多点指示	标尺长 300 mm,刻度清晰,读数 方便
小型圆标尺指示仪	XWE XQE XDE	单针、双针指示	外形尺寸小,标尺直径 110 mm,指 示清晰,占仪表盘面积较小
中型圆图指示记录(调 节仪)	XWG XQG XDG	单针指示、单笔记录、附电动 或气动 PID 调节器	结构简单,标尺直径 200 mm,在较 远距离能清楚观看
大型圆图指示记录(调 节仪)	XWB XQB XDB	同中型圆图仪	标尺直径 300 mm,能远距离观看 仪表读数
小型长图指示记录(调 节仪)	XWD XQD XDD	单笔、双笔、多点记录、附电 动或气动 PID 调节器	外形尺寸小,标尺长度 120 mm
中型长图指示记录(调 节仪)	XWF XQF XDF	单笔(快速、小信号)、双笔、 多点记录,附电动或气动 PID 调节器	标尺长 180 mm,记录纸可见幅面 大,记录清晰
大型长图指示记录(调 节仪)	XWC XQC XDC	单笔(温差、快速、小信号)、 双笔(快速、小信号)、多点记 录、附电动或气动 PID 调节器	标尺长 250 mm,记录纸可见幅面 大,记录清晰
便携式长图指示记录仪	XWX XQX XDX	单笔、双笔记录	标尺长 180 mm,便捷式,干电池或 220 V 交流供电
实验室台式长图指示记 录仪	XWT	单笔、双笔、四笔、六笔、八笔 记录	最小电量为 1 mV,标尺长 250 mm, 具有较高的灵敏度和平衡速度

3) 力矩电动机式温度指示调节仪 力矩电动机式温度指示调节仪的测量原理和电子自动电位差计和电子自动平衡电桥相似。只不过是放大器的输出驱动以力矩电动机代替可逆电动机。力矩电动机可直接(而非通过变速齿轮)改变测量桥路的滑动触点并指示出温度。通过双稳态触发电路,分别驱动上下限继电器动作,进行温度调节和报警。力矩电动机式温度指示调节仪是一种小型条式自动平衡仪表(开面尺寸为 80 mm×160 mm),该仪表耐振性强,可任意倾斜安装且与检测元件的连接可不考虑连线电阻。表 9-97 是常用力矩式温度指示调节仪表型号。

表 9-97 常用力矩电动机式温度指示调节仪表型号

型 号		附加调节 装置类型	型 号		附加调节 装置类型
检测元件为热电 偶或辐射感温器	检测元件 为热电阻		检测元件为热电 偶或辐射感温器	检测元件 为热电阻	
XBW-001 单针指示	XBD-001 单针指示	无	XBW-101 单针指示	XBD-101 单针指示	三位电接点
XBW-002 色带指示	XBD-002 色带指示		XBW-102 色带指示	XBD-102 色带指示	
XBW-003 单针并记录	XBD-003 单针并记录		XBW-103 单针并记录	XBD-103 单针并记录	

(续表)

型 号		附加调节 装置类型	型 号		附加调节 装置类型
检测元件为热电 偶或辐射感温器	检测元件 为热电阻		检测元件为热电 偶或辐射感温器	检测元件 为热电阻	
XBW-201 单针指示	XBD-201 单针指示	电阻发信	XBW-301 单针指示	XBD-301 单针指示	电动PID
XBW-202 色带指示	XBD-202 色带指示		XBW-302 色带指示	XBD-302 色带指示	
XBW-203 单针并记录	XBD-203 单针并记录		XBW-303 单针并记录	XBD-303 单针并记录	

### 3. 数字式温度显示调节仪表

数字式温度显示调节仪表功能多,智能化程度高,可多量程输入,控制精确,能实行工艺程序控制和监控,是热处理生产的现代化控制仪表。数字显示调节仪表大致分为两类,见表9-98。表9-99是通用型数字指示调节仪表(LT系列)的型号规格、技术参数。

表9-98 数字显示调节仪表类型

类 型	结 构 形 式	主 要 功 能
显示调节仪	集成电路为硬件核心,具有测量调节—显示—调节功能	数字显示,位式调节,报警控制
智能化调节仪	微处理器为核心,具有测量—运算—显示—调节功能	程序控制

表9-99 通用型数字指示调节仪表(LT系列)的型号规格、技术参数

型号	输入信号		控温 范围 (℃)	显示和 给定精度	采样 周期(s)	调节 方式	输 出	显示机能	报警 点数	电源 电压
	热电偶	热电阻								
LT110	K J E N	Pt100 JPt100	0~1370 0~1000 0~800 0~1390 -200~850 -200~500	热电偶为 $\pm 0.3\% \pm 1$ 度, 热电阻为 $\pm 0.3\% \pm 1$ 度	$\approx 0.25$	PID	开关脉冲形 阻抗负载: 250 V AC 3A 感抗负载: 250 V AC 1A 电流输出形 4~20 mA DC	LED4位 PV值、SV值 显示切换,参数 设定内容显示	1点	100~240 V AC, 50/ 60 Hz, 自由 电源, 功 耗5 VA
LT230	B R S N K E J	Pt100 JPt100	0~1820 0~1760 0~1760 0~1300 -200~1370 -200~700 -200~900 -200~850 -200~649	$\pm 0.3\% \pm 1$ 度(B型), $\pm 0.25\% \pm 1$ 度 (J型)	$\approx 0.5$	开关脉冲 形PID 电流输入 形PID SSR驱动脉 冲PID 电压输 出PID	开关脉冲形 阻抗负载: 100 V AC 3 A, 240 V AC 3 A 感抗负载: 100 V AC 1.5 A, 240 V AC 1.5 A 电流输出形 4~20 mA DC	LED4位	2点	100 ~ 240 V AC, 50/60 Hz, 自由电源, 24 V DC, 功 耗10 VA



(续表)

型号	输入信号		控温范围(℃)	显示和给定精度	采样周期(s)	调节方式	输出	显示机能	报警点数	电源电压
	热电偶	热电阻								
LT350与LT370	B R S N K E J	Pt100 JPt100	0~1 820 0~1 760 0~1 760 0~1 300 -200~-1 370 -200~-700 -200~-900 -200~-850 -200~-649	测量量程的 $\pm 0.25\% \pm 1$ 度	$\approx 0.5$	开关脉冲形PID 电流输入形PID SSR驱动脉冲PID 电压输出PID 二位式控制	开关脉冲形 阻抗负载: 100 V AC 5 A, 240 V AC 5 A, 30 V DC 5 A 感抗负载: 100 V AC 2.5 A, 240 V AC 2.5 A, 30 V DC 2.5 A 电流输出形 4~20 mA DC	7段LED 4位2行 个别LED 5个状态显示	3点	100 ~ 240 V AC, 50/60 Hz, 自由电源, 24 V DC, 功耗 14 VA
LT450与LT470	B R S N K E J T	Pt100	0~1 820 0~1 760 0~1 760 0~1 300 -200~-1 370 -200~-700 -200~-900 -200~-400 -200~-850 -200~-649	测量量程的 $\pm 0.1\% \pm 1$ 度	$\approx 0.2$	自整定PID	开关脉冲形 阻抗负载: 100 V AC 5 A, 240 V AC 5 A, 30 V DC 5 A 感抗负载: 100 V AC 2.5 A, 240 V AC 2.5 A, 30 V DC 2.5 A 电流输出形 4~20 mA DC	7段LED 5位2行 8个 个别LED 状态显示	2点	100 ~ 240 V AC, 50/60 Hz, 自由电源, 功耗最大 约 16 VA
LT830	B R S N K E J T	Pt100	0~1 820 0~1 760 0~1 760 0~1 300 -200~-1 370 -200~-700 -200~-900 -200~-400 -200~-850 -200~-200	测量量程的 $\pm 0.3\% \pm 1$ 度	$\approx 0.5$	开关脉冲形PID SSR驱动脉冲型PID	开关脉冲形 阻抗负载: 100 V AC 3 A 240 V AC 3 A 30 V DC 3 A 感抗负载: 100 V AC 1.5 A 240 V AC 1.5 A 30 V DC 1.5 A SSR驱动脉冲 4~20 mA DC	7节LED 4行2段 个别LED 5个状态显示	2点	100 ~ 240 V AC, 50/60 Hz, 24 V AC/ DC, 功耗 6 VA

#### 4. 数字智能调节仪

数字智能调节仪配置有微处理机和各种模块化结构,能进行多种控制运算,具备多种使用功能,是实施现代化自动控制的智能仪表。数字智能调节仪种类很多,功能不尽相同,但综合起来主要有以下几种功能。

(1) 数据输入功能:可模拟量输入信号也可以数字输入。模拟量输入有热电偶、热电阻、直流电流、直流电压、4~20 mA DC、1~5 V DC 信号。数字输入主要是开关量输入。

(2) 控制功能:能实现前馈控制、非线性控制、纯滞后时间补偿控制及超前控制等。控制算法有常规的PID带自整定控制,有连接PID控制、模糊控制、超调抑制PID控制及能自动微调的PID控制(神经元控制)。

(3) 输出功能:具有模拟输出和数字输出功能,模拟输出信号为4~20 mA DC,数字输出有SPST继电器输出、SPDT继电器输出和集电极开路输出。

(4) 显示设定功能:LED数码管显示设定值与实时值,操作键实现各种编程和状态检查。

(5) 通信功能: 具有 RS-485 或 RS-232 半双工通信协议, 能进行多点通信。各种类型的数字智能调节仪往往只具有上述的一种或几种功能, 选择时要根据工程的实际需要进行功能配置。

例如 DB1000 系列数字智能调节仪, 该调节仪采用高性能微处理器, 指示精度为  $\pm 0.1\%$ , 采样周期达 0.1 s, 具有 8 种设定功能和多种信号输入。DB1000 系列数字智能调节仪技术参数见表 9-100。

表 9-100 DB1000 系列数字智能调节仪的技术参数

参数名称	技术指标
输入信号	热电偶——B、R、S、K、E、J、T、WWR <sub>e5</sub> ~26、WWR <sub>e0</sub> ~26、Ni~NiMo、AuFe~Cr、Nicrosil~Nisil、PR20~40、platinel、U、L 直流电压—— $\pm 10$ mV、 $\pm 20$ mV、 $\pm 50$ mV 直流电流: $\pm 20$ mA 热电阻——Pt100、JPt100、旧 Pt50、Pt-Co
输入量程	1 型——热电偶 28 种、直流电压 5 种、直流电流 1 种, 共 34 种 2 型——热电阻 Pt100, 5 种; JPt100, 5 种; IHPt50, 1 种; Pt-Co, 1 种, 共 12 种
测量精度	输入量程的 $\pm 0.1\% \pm 1$ 字或 $10 \mu\text{V}$ 中较大的值 (热电偶输入时不包括基准点补偿精度)
基准点补偿精度	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
采样周期	$\approx 0.1$ s (有模糊运算功能的约 0.2 s)
刻度化	直流电压、直流电流输入——4 位内任意
断偶保护	热电偶输入 mV 输入时标准配备上限断偶保护 断偶时可设定调节输出 $(-15\% \sim 105\%)$ 内任意的值输出
测量输入补偿(传感器)	显示分辨率的 $\pm 100$ 倍
数字滤波	滤波常数 0~99.9 s
显示方式	第二显示部——矩阵 LCD 显示(用冷极放电管)
电源	85~264 V AC 自由电源, 50 Hz、60 Hz
使用温度范围	$-10 \sim 50^\circ\text{C}$
使用湿度范围	90% RH 以下(无结露)
停电措施	由 EEPROM 保存设定的参数
信号源允许阻抗	热电偶·毫伏输入—— $100 \Omega$ 以下 伏特输入—— $300 \Omega$ 以下 热电阻输入——每线 $5 \Omega$ 以下
输入阻抗	热电偶·电压输入—— $8 \text{ M}\Omega$ 以上 电流输入—— $\approx 250 \Omega$
测量电流	热电阻输入 $\approx 2$ mA
功耗	$\approx 12$ VA
安装方法	嵌装式
重量	$\approx 750$ g
报警规格: 报警点数 报警方式 报警不灵敏区 报警输出	1 种调节设定值有 4 个报警点 上限、下限、偏差报警, 绝对值报警。各设定值可分别任意设定(有报警待机功能) 设定分辨率的 1000 倍 晶体管开路集电极输出(最大负载 24 V 50 mA DC) 报警 1、报警 2——公用端通用 报警 3、报警 4——公用端通用

### 三、温度控制系统的应用

#### 1. 电阻炉温度自动控制回路

1) 电阻炉温度位式调节回路 见图 9-33, 该控制回路是最简单的通断式手动或自动炉温控制电路。

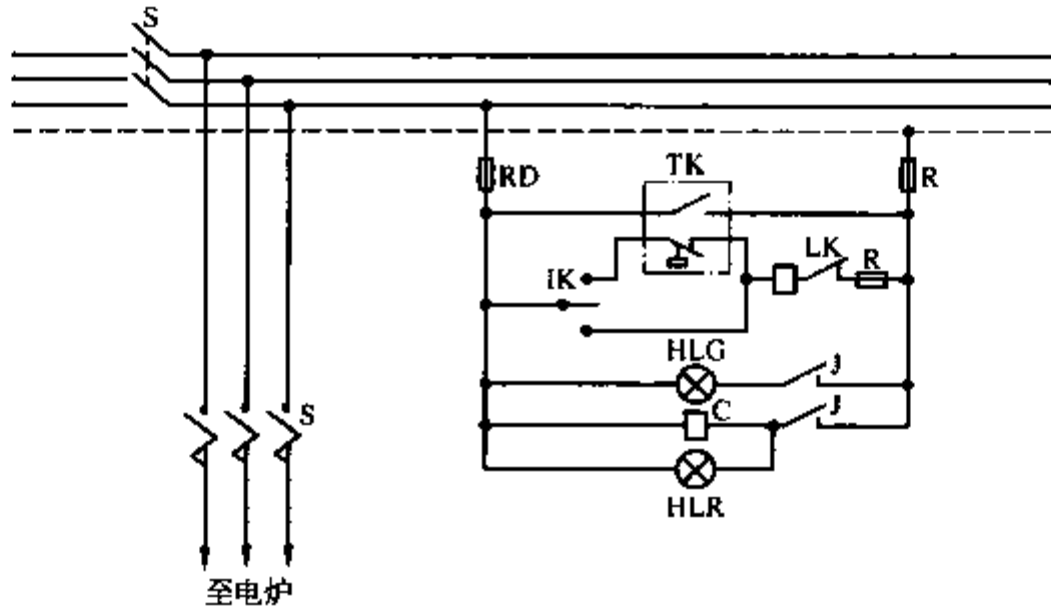


图 9-33 二位式温度调节系统电路图

S—自动空气开关; IK—主令开关; C—交流接触器; J—中间继电器; HLG、HLR—指示灯; RD—熔断器; TK—温度调节仪; LK—连锁开关; R—高温熔断器

2) 采用功率控制器的温度控制电路 图 9-34 是其方框示意图。该控制电路具有软起动、恒流、限流、过流保护、过热保护功能, 可实行平滑无级调节, 炉温波动小, 如配用数字智能调节仪表可实施炉温的精确控制。

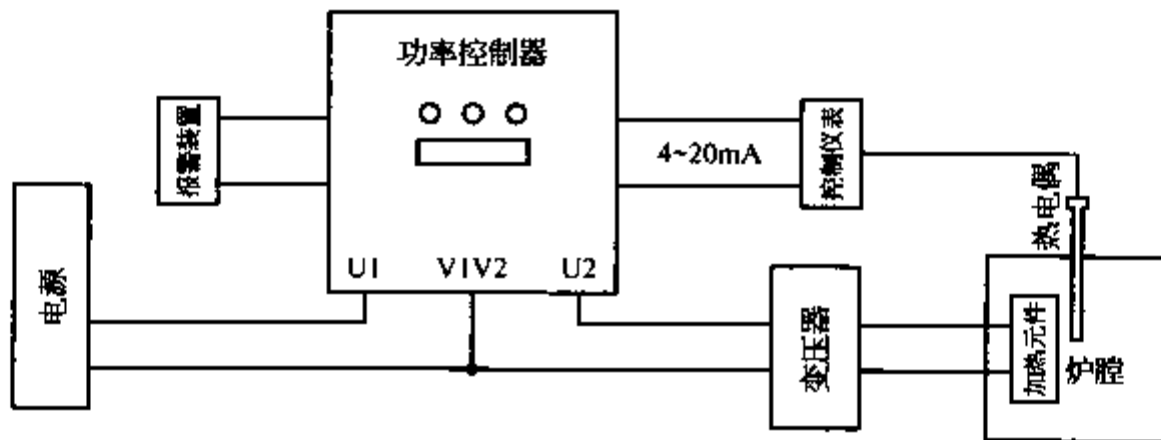


图 9-34 采用功率控制器的温度控制电路方框示意图

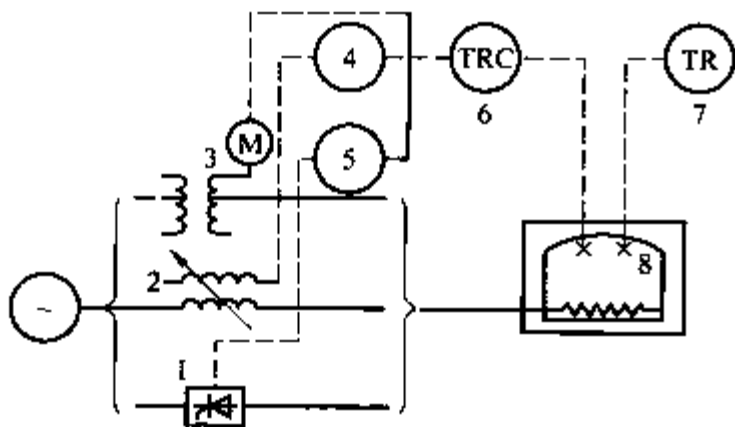


图 9-35 电阻炉 PID 控制方案示例

1—晶闸管装置; 2—饱和电抗器; 3—电动无级调压变压器;  
4—辅助放大器; 5—触发器; 6—温度记录调节仪;  
7—温度记录仪; 8—电阻炉

3) 电阻炉 PID 控制回路 PID 控制因执行机构不同, 其组合选用方案也不同。图 9-35 是 PID 控制方案示例。

#### 2. 真空炉温度控制系统

1) 真空炉两点控温式电路系统 该控温系统采用 UDC3300 或 IPC550 双回路触摸屏式程序控制器, 有两个输入信号, 可在热电偶信号与红外仪之间实行自动切换, 不仅可节省一个仪表, 而且真正实现了程序不中断。图 9-36 是真空炉两点控温式电路系统的方框示意图。

2) 真空炉三点控温式电路系统 控制单元采用 IPC550 单回路触摸屏式程序控制器下拖两个 UDC2300 式控制器, 可充分利用 IPC550 的控制界面和多个程序,

操作方便,又可储存更多程序段。图 9-37 是真空炉三点控温式电路系统方框示意图。

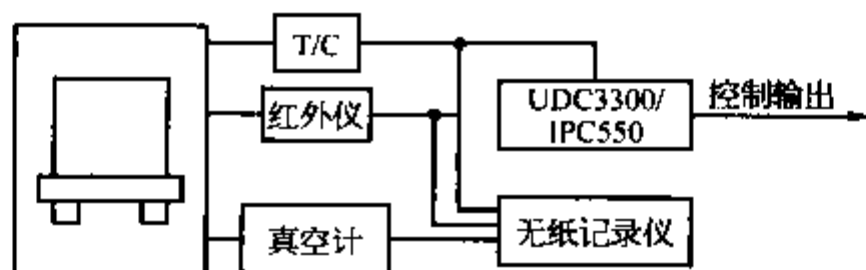


图 9-36 真空炉两点控温式电路系统的方框示意图

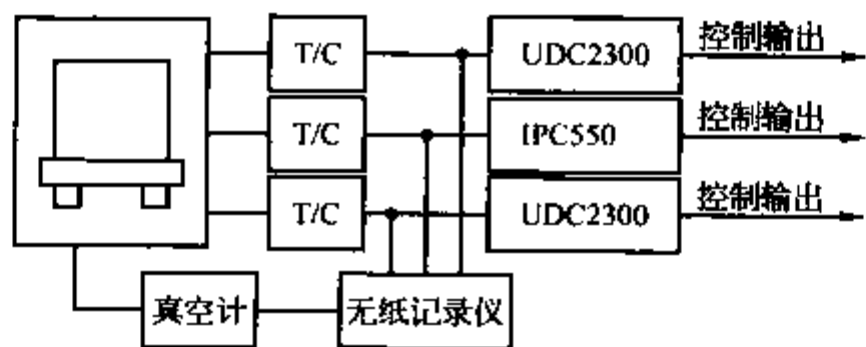


图 9-37 真空炉三点控温式电路系统方框示意图

### 3. 燃料炉温度控制系统

1) 燃料炉温度控制系统 系统把燃烧装置与控制系统(炉压控制系统、燃料压力自动调节系统、热风压力自动调节系统、智能压力保护控制系统、热风温度控制及自动放散系统、燃烧控制系统)紧密结合在一起,实行燃料炉的炉温自动控制。几种常用燃料炉炉温控制系统见图 9-38。

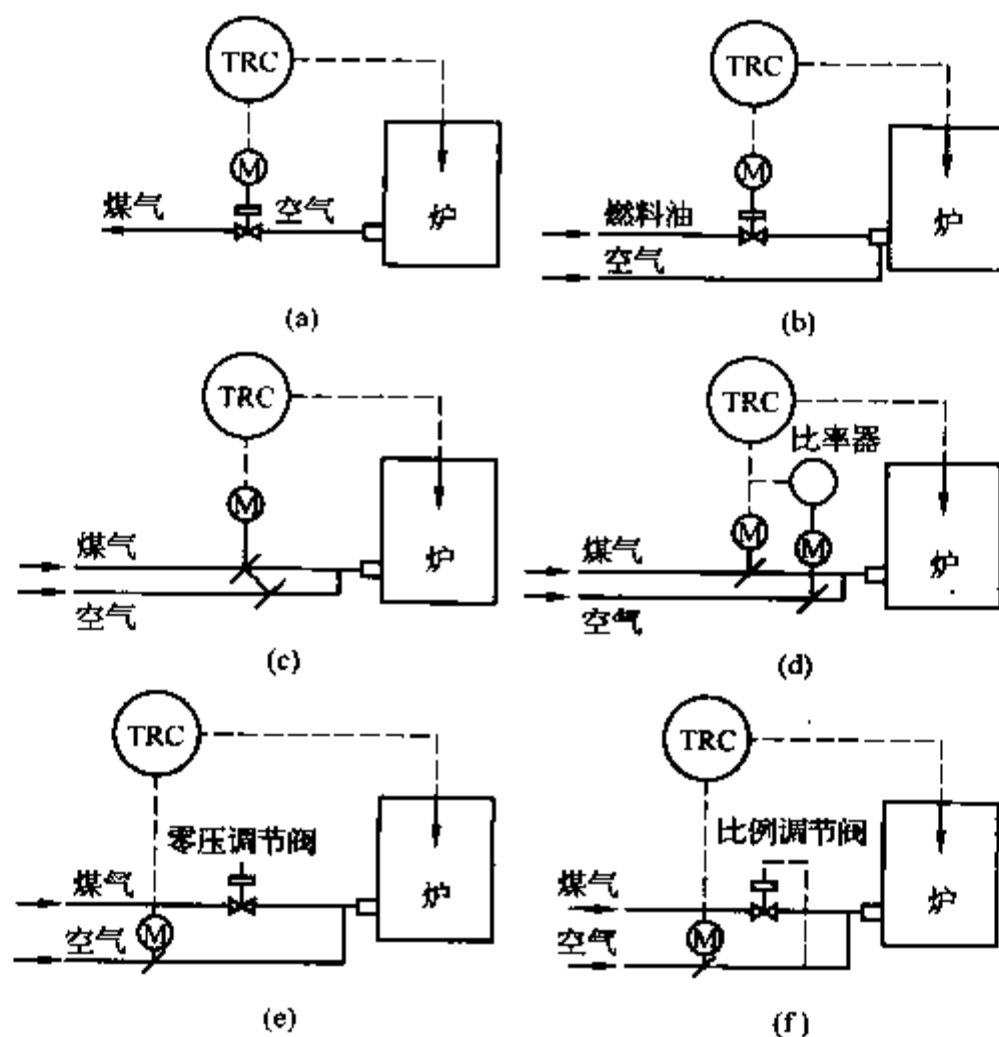


图 9-38 几种常用燃料炉炉温的控制系统的示意图

(a) 方案一; (b) 方案二; (c) 方案三; (d) 方案四; (e) 方案五; (f) 方案六

2) 燃油炉的微型计算机控制系统 该系统采用微型计算机对燃油炉的空气与油的配比以及炉温进行控制,利用 DDC 软件来实行控制。图 9-39 是燃油加热炉微机 DDC 控制系统方框图。

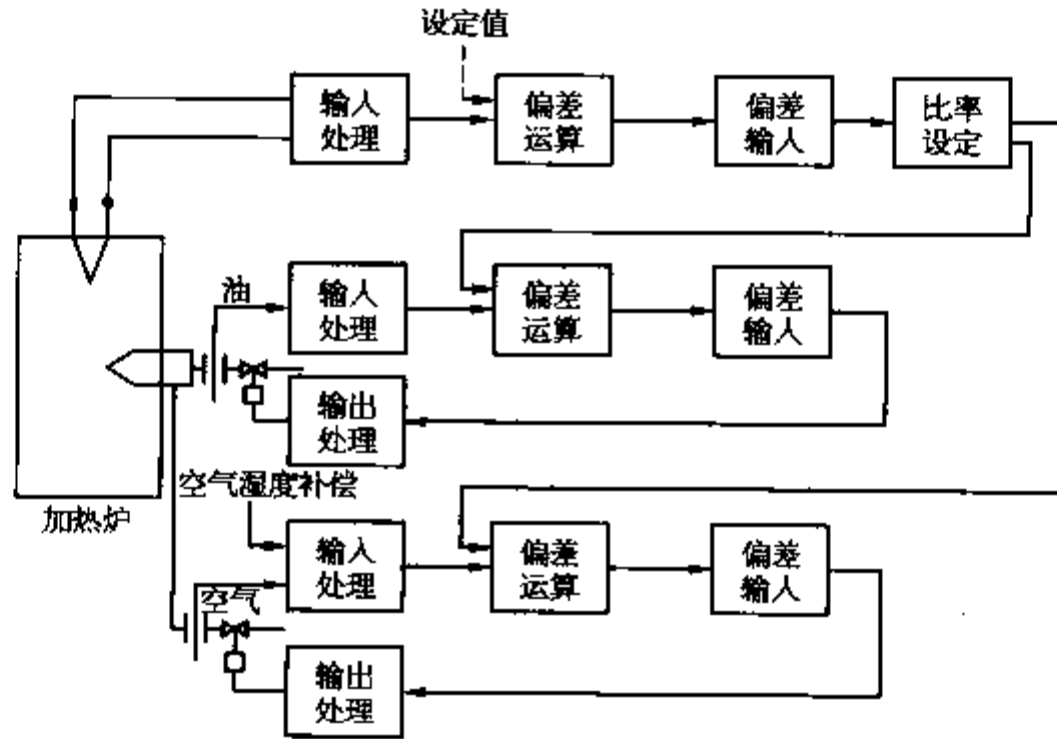


图 9-39 燃油加热炉微机 DDC 控制系统

#### 四、热处理炉内的气氛控制系统

##### 1. 数字式控制器组成的碳势控制系统

图 9-40 是 UDC3300 数字控制器组成的单点碳势控制方框图。图 9-41 是单点碳势/温度集控方框图。单点碳势控制可实现载气和空气的双重控制,适用于箱式炉或连续炉的碳势控制,控制精度为  $\pm 0.05\%C$ 。单点碳势/温度集控适用于并式炉碳势/温控。另外可通过计算机通讯接口 RS485 与计算机连接实行计算机监控,此气氛控制系统采用的传感元件为热电偶/氧化钨探头。

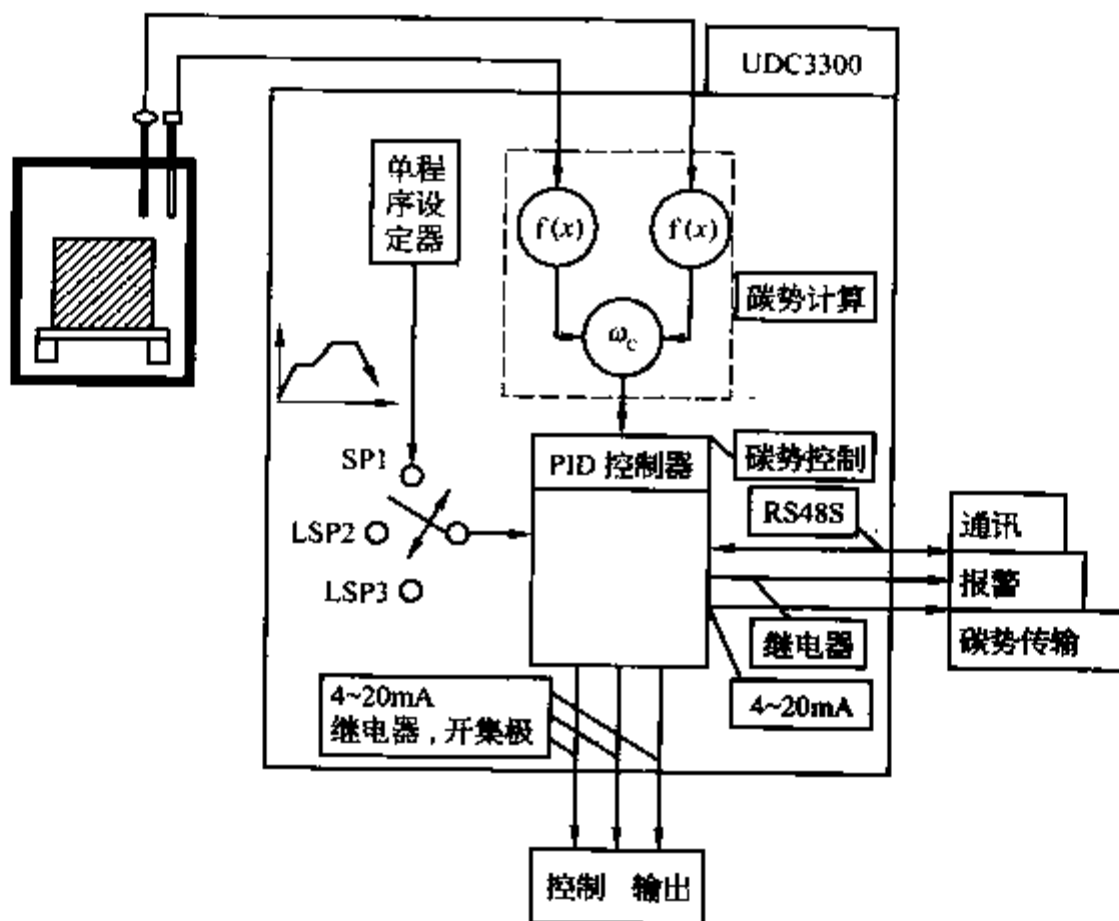


图 9-40 单点碳势控制方框图

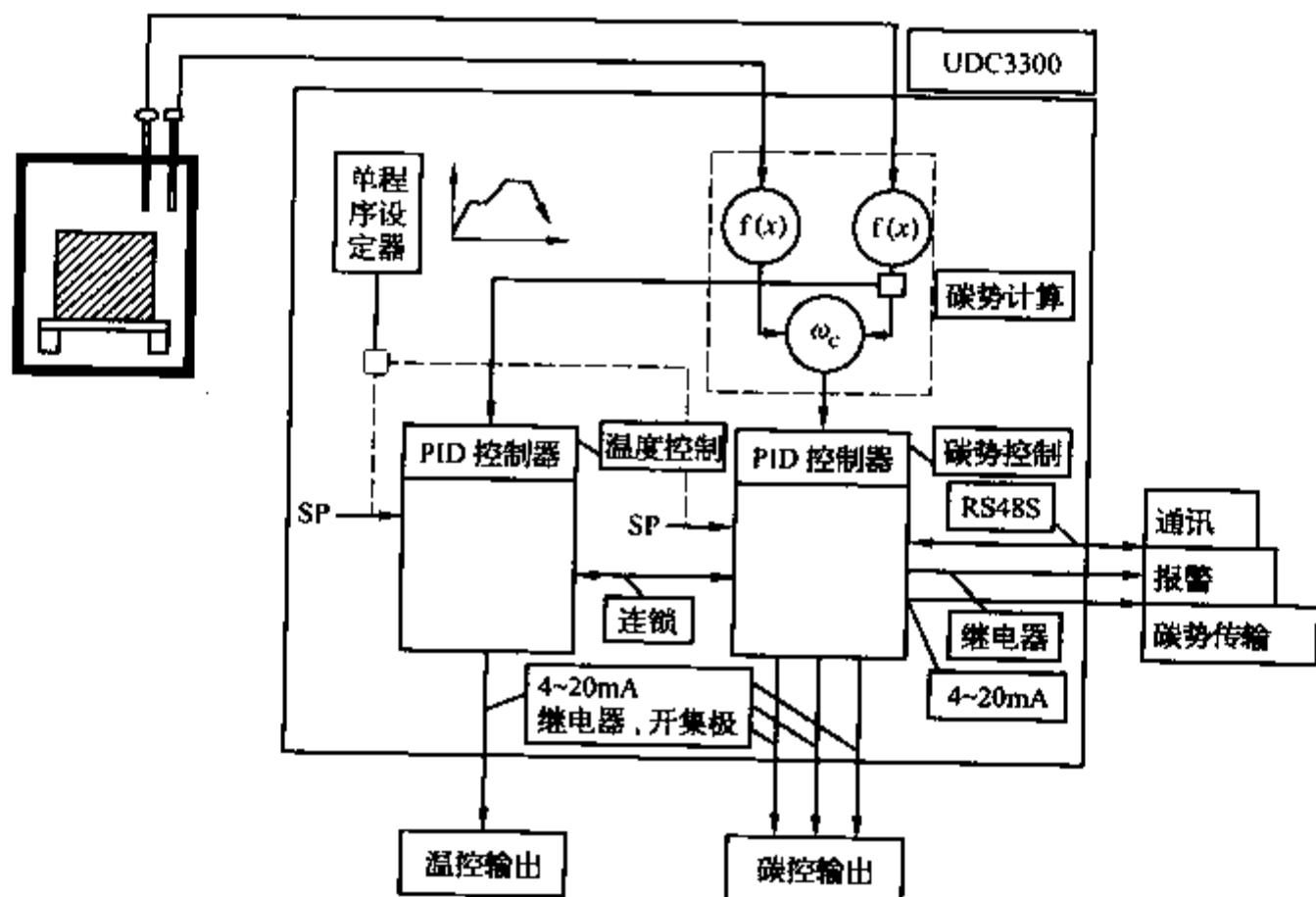


图 9-41 单点碳势/温度集控方框图

2. VRX100/180 无纸记录控制器组成的碳势控制系统

此碳势控制系统适用于箱式多用炉的碳势和温控。其特点是控制精度高、稳定可靠、操作便捷,可将工艺曲线预存在控制器中,便于工艺修改和现场操作。图 9-42 是 VRX 100 无纸记录控制器碳势控制系统方框图。

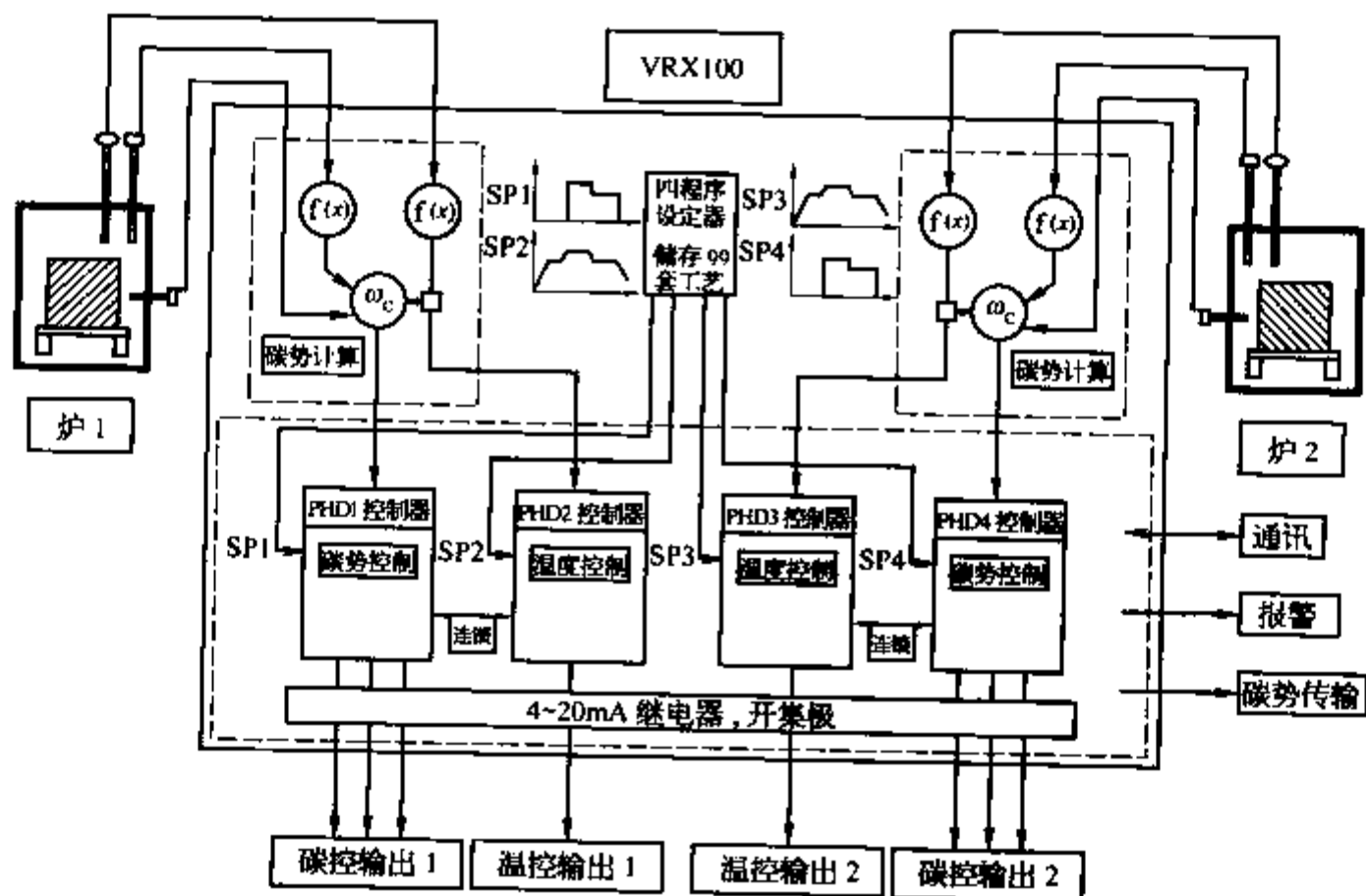


图 9-42 VRX100 无纸记录控制器碳势控制系统方框图

3. 碳势微机控制系统

图 9-43 为井式渗碳炉气氛碳势微机控制系统方框图。

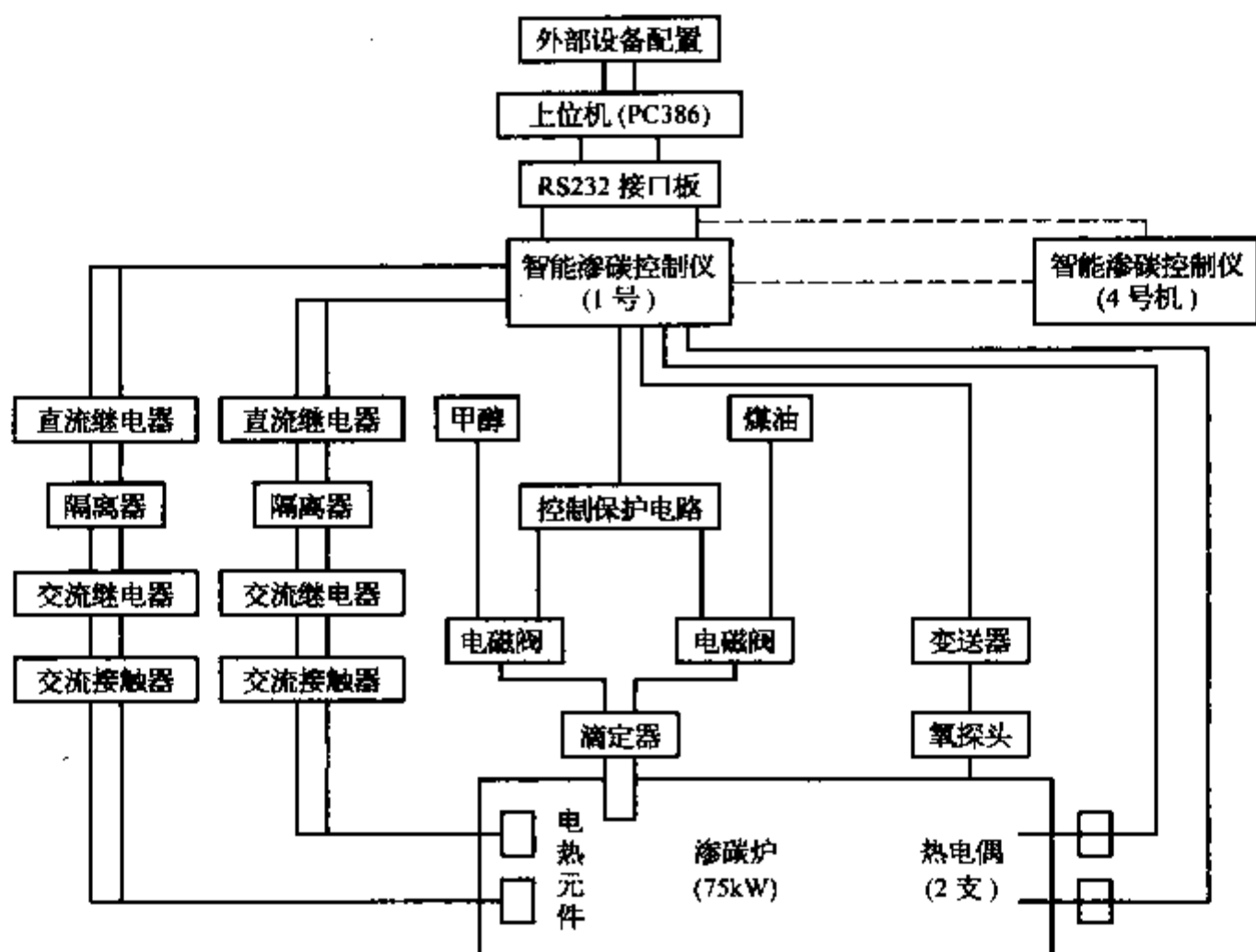


图 9-43 井式渗碳炉气氛碳势微机控制系统方框图

## 五、流量计

### 1. 流量计的类型

按流量计的结构原理,流量计大致有:容积式流量计、叶轮式流量计、差压式流量计、面积式流量计(等压降式)、动量式流量计、冲量式流量计、电磁流量计、超声波流量计、流体振荡式流量计、质量流量计、涡街流量计等几种类型。

### 2. 热处理常用流速计、流量计

热处理常用流速计见表 9-101;常用流量计的性能见表 9-102。

表 9-101 热处理设备常用的流速计

类别	名称	流速范围(m/s)	精度	使用场合
涡轮式流速计	螺旋桨式风速计	0~35	±(2%~3%)	环境风速、巨型设备内风速
	转杯式风速计	1~30		
	翼式风速计	0.5~20		
动压式流速计	标准毕托管	>5	按校正情况定	管道内清洁无灰流体
	直型毕托管	>5		管道内热气体
	S型毕托管	>5		管道内多灰尘气体
	光劈型毕托管	>5		管道内多灰尘气体
	三孔探针	可测极小值		平面气流测量
	五孔探针	可测极小值		空间气流测量

(续表)

类别	名称	流速范围(m/s)	精度	使用场合
热力学流量计	热球式风速计	0~30	±0.5%	一般冷风速度测量
	热风风速仪	上限可达500	精密度高	测量多维不稳定态速度场,适于不透明介质,被测对象几何雄壮复杂
激光测速仪		$10^{-6} \sim 15 \times 10^2$	精密度高	实验室内测量多维速度场,只适于透明介质,也可测量钢液等不透明的表面速度

表 9-102 常用流量计的性能

类别	名称	被测介质	管径(mm)	测量范围(m <sup>3</sup> /h)	工作温度(°C)	工作压力(MPa)	精度等级	安装要求
速度式	水表	液体	15~600	0.045~3 000	40~100	0.6	2	水平安装
	涡轮式流量计	液体	4~500	0.04~600	120		0.5~1	
气体		10~500	2~8 000					
转子式流量计	玻璃管转子式流量计	液体	4~100	0.0015~100	0~60	0.1	1~2.5	垂直安装
		气体		0.0018~3 000	0~100			
	金属管转子流量计	液体	15~150	0.06~100	150	1.6~6.4	1~2.5	垂直安装
		气体		2~3 000				
容积式流量计	椭圆齿轮流量计	液体	10~250	0.005~500	60	1.6	0.5	需装过滤器
	旋转活塞流量计	气体	15~100	0.2~90	120	0.6~1.6	0.2~0.5	
容积式流量计	腰轮流量计	液体	15~300	~1 000	60	2.5~6.4	0.2~0.5	需装过滤器
	皮囊式流量计	气体	15~25	0.2~10	40		2	
旋涡流量计	旋进旋涡型	气体	50~150	10~5 000	60		1	需较短的直管段
	卡门旋涡型	气体	150~1 000	1~30 m/s	150		1	需直管段,不准倾斜
靶式流量计		液体、气体、蒸气	15~200	0.8~400	200		1~4	需直管段
电磁流量计		导电液体	6~900	0.1~20 000	100		1	无要求
超声波流量计		液体	范围广				±(2%~3%)	需直管段
动压平均管(双笛型管、阿牛巴管)		气体	25~9 000				1	水平管道

## 六、压力测量仪表

热处理生产中的压力测量仪表主要用于气体介质、液体介质、气体燃料、液体燃料、炉内气氛等压力的测量和真空度的测量。常用的压力测量仪表性能及用途见表 9-103。



表 9-103 压力测量仪表性能及用途

类别	名称		测量范围(MPa)	精度	用途
滚柱式 压力表	U形管压力计		0~20 000 Pa	1.5	测量气体压力,也可用作差压流量计,校验气动单元组合仪表
	杯形压力计	单管	3 000~15 000 Pa	1.5	
		多管	-2 500~6 300 Pa		
	倾斜式压力计		-500~1 250 Pa	1	测量气体微压、炉膛压力
补偿式微压计		0~1 500 Pa	0.5		
弹簧式 压力表	普通弹簧压力表		0.1~60	1.5	测量气体、蒸气、液体压力
	双针双管压力表		0~6	1.5	测量介质两点的压力
	双面压力表		0~2.5	1.5	两面显示同一测点的压力
	精密压力表		-0.001~0.100 至 0~250 的各种规格		可进行精密压力测量和计量
	电接点压力表		0~6		用于自动控制的压力表
弹簧式 压力表	真空压力表		-0.1~0.1, -0.1~0.15, -0.1~0.3, -0.1~0.5, -0.1~0.9, -0.1~1.5, -0.1~2.4	1.5	粗测真空度的压力表
	电接点真空压力表		-0.1~0.1, -0.1~0.15, -0.1~0.3, -0.1~0.5, -0.1~0.9, -0.1~1.5		用于自动控制的真空压力表
专用弹 簧压力表	氧气压力表		-0.1~60	2.5	测氧气压力
	氢气压力表		0~60		测量氢气压力
	氨用压力表		-0.1~60	1.5	测量液氨和氨气的压力
	乙炔压力表		0~2.5	2.5	测量乙炔的压力

## 第五节 筑炉材料

### 一、耐火材料

#### 1. 常用耐火材料

1) 常用耐火材料种类 常用耐火材料通常有黏土质耐火砖、高铝砖、轻质耐火砖、刚玉砖、高氧化铝制品、碳化硅砖、抗渗碳砖等。

2) 常用耐火材料性能 热处理炉常用耐火材料的性能见表 9-104, 常用特种耐火材料的性能见表 9-105。

表 9-104 热处理常用耐火材料的性能

名称	主要成分 (%)	耐火度 (°C)	荷重软化温度 (°C)	热稳定性	耐压强度 (MPa)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	显气孔率 (%)	热导率 [W/(m·°C)]	最高使用温度 (°C)	比热容 [kJ/(kg·°C)]	主要用途
重质黏土砖	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 30~40	1 670~1 730	1 250~1 400	良好	7.48~12.25	1.8~2.2	18~30	0.83+0.58 ×10 <sup>-3</sup> T	1 200~1 300	0.87+0.23 ×10 <sup>-3</sup> T	较重负荷炉衬及炉底, 盐浴炉盐槽

(续表)

名称	主要成分 (%)	耐火度 (°C)	荷重软化温度 (°C)	热稳定性	耐压强度 (MPa)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	显气孔率 (%)	热导率 [W/(m·°C)]	最高使用温度 (°C)	比热容 [kJ/(kg·°C)]	主要用途
轻质黏土砖	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >40	1710	1300	良好	4.41	1.3	45~80	0.40+0.34 ×10 <sup>-3</sup> T	1400	0.83+0.26 ×10 <sup>-3</sup> T	中高温电阻炉内衬,保温层
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >40	1670	1250	良好	3.43	1.3	45~80	0.40+0.34 ×10 <sup>-3</sup> T	1300	0.83+0.26 ×10 <sup>-3</sup> T	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >35	1670	1250	良好	2.94	1.0	45~80	0.29+0.20 ×10 <sup>-3</sup> T	1300	0.83+0.26 ×10 <sup>-3</sup> T	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >35	1650	1250	良好	1.96	0.8	45~80	0.20+0.43 ×10 <sup>-3</sup> T	1250	0.83+0.26 ×10 <sup>-3</sup> T	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >35	1650	1250	良好	0.98	0.6	45~80	0.16+0.19 ×10 <sup>-3</sup> T	1250	0.83+0.26 ×10 <sup>-3</sup> T	
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >35	1650	1250	良好	0.58	0.4	45~80	0.09+0.16 ×10 <sup>-3</sup> T	1150	0.83+0.26 ×10 <sup>-3</sup> T	
超轻质黏土砖	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >30	1710~1730	1130~1260	良好	0.49~1.47	0.27~0.33	—	0.05+0.17 ×10 <sup>-3</sup> T	1100		保温层
重质高铝砖	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 45~75	1750~2000	>1450	良好	>39.2	2.3~2.55	10~26	2.09+1.86 ×10 <sup>-3</sup> T	1600~1700	0.83+0.23 ×10 <sup>-3</sup> T	高温炉炉衬,捆砖,盐槽
高氧化铝砖	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 99.5~99.9	2000	1850	良好	78.4	3.6~3.9	<0.2	2.9(100°C) 5.8(1000°C)	1800~1900	0.79+0.41 ×10 <sup>-3</sup> T	高温炉管,电热元件支架

注: T为制品的平均温度。

表 9-105 特种耐火材料性能

产品名称	化学成分(质量分数,%)			耐火度 (°C)	荷重软化温度(°C)	耐压强度 (MPa)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	重烧收缩 (°C,%)	最高使用温度 (°C)	主要用途
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							
高铝泡沫砖	>65		<2.0	1750		1	0.5~0.6	1400, <0.2	1500	高温电炉耐高温保温材料
氧化铝泡沫砖	>85		<0.5	1800		1	0.5~0.6	1600, <0.5	1600	用于1600°C MoSi <sub>2</sub> 高温电炉炉衬材料
纯氧化铝空心球制品	>98		<0.5	2000		6	1.2~1.4	1600, <0.5	1800	用于1700°C MoSi <sub>2</sub> 高温电炉炉衬材料
氧化铝高强度空心砖	>98	<0.5	<0.5	1800	2 kg: 1650	6	0.8~1.0	1600, <0.5	1700	1600°C以上高温炉衬
高强度铝轻质砖	>60	<0.5		1790		5	0.8	1400, <0.5	1450	高温炉炉衬,在1450°C高温可直接接触火焰
轻质抗渗碳砖	50	1.0	<0.5	1790		4.5	1.0~1.2	1400, <0.5	1450	可控气氛渗碳炉衬,抗还原性气体侵蚀
碳砖	C>90					34.32	1.6		700	
重质抗渗碳砖	50		<0.5	1990		30	2.0	1400, <0.5	1450	

(续表)

产品名称	化学成分(质量分数,%)			耐火度(°C)	荷重软化温度(°C)	耐压强度(MPa)	密度(t/m <sup>3</sup> )	重烧收缩(°C,%)	最高使用温度(°C)	主要用途
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							
一般刚玉砖	80~90		<0.6	1800	2 kg: 1670	50	2.8	1600, <0.5	1650	1600°C以上高温炉炉衬、炉芯和炉用配件
低硅刚玉砖	>98	<0.5	<0.5	1900	2 kg: 1750	50	3.0	1600, <0.5	1700	
碳化硅砖		SiC 60~90	1.0	1800		50	2.5	1400, <0.5	1400	炉底板、炉管及远红外辐射板
刚玉炉管	50~98	<0.6	<0.5	1800			2.9		1600	各种高温电炉炉管、炉芯及炉膛
镁砖	MgO >87	CaO <3.0		2000		39~59	2.8		1450	炉衬
镁铝砖							2.75		1650	炉衬
硅砖	>93			1700	1620	16	1.9		1650	
红砖							1.6		700	炉衬

## 3) 热处理炉常用耐火砖规格(表 9-106)

表 9-106 热处理炉常用耐火砖规格

## 1. 直形砖

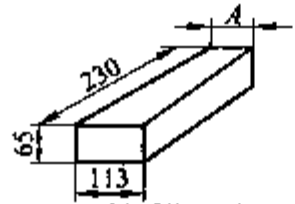
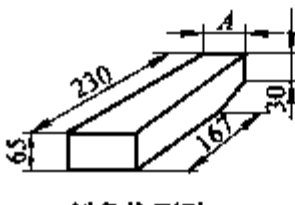
名称	尺寸(mm)			每块质量(kg)					原冶金部标号	用途
	A	B	C	耐火黏土砖	轻质耐火黏土砖	硅藻土砖	超轻质泡沫高铝砖	高铝砖		
直砖	230	113	65	3.5	2.1	1.2	0.7	3.8	T-3	箱式炉炉墙
薄形直砖	230	113	50	2.6	1.56			2.8	T-4	箱式炉炉墙,其中耐火黏土砖常用于支撑耐热钢炉底板
	230	113	40	2.1	1.36			2.6		
	230	113	35	1.75	1.1		0.31	1.9		
大形直砖	600	230	90	25				26.3		平顶箱式炉炉顶
	462	199	113		12.6					
	462	228	65		8.3					
	370	180	110		9.5					

## 2. 楔形砖

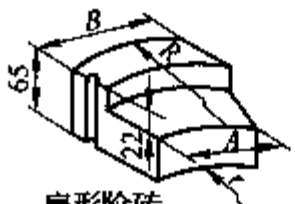
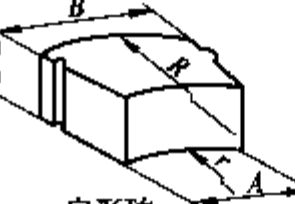
尺寸 A (mm)	每块质量(kg)			原冶金部标号	用途
	耐火黏土砖	轻质耐火黏土砖	高铝砖		
55	3.1	1.9	3.4	T-38	拱顶
45	2.9	1.8	3.2	T-39	

(续表)

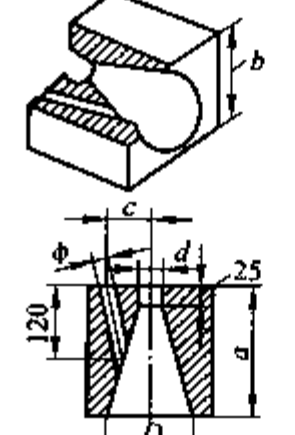
## 3. 轻质楔形砖及斜角楔形砖

 轻质楔形砖  斜角楔形砖	材 料	尺寸 A (mm)	每块质量(kg)		用途(井式炉)
			轻质楔形砖	斜角楔形砖	
	轻质耐火黏土	60	1.65	1.5	27 块砌 $D_{\text{炉}}=544$
		68	1.70	1.54	32 块砌 $D_{\text{炉}}=712$
		74	1.75	1.6	37 块砌 $D_{\text{炉}}=894$

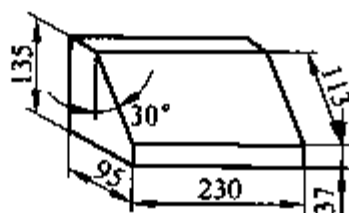
## 4. 轻质扇形阶砖及扇形砖

 扇形阶砖  扇形砖	材料	尺寸(mm)				每块质量(kg)		用途(井式炉)
		A	B	C	D	轻质扇形阶砖	轻质扇形砖	
	轻质耐火黏土	105	150	300	210	0.85	1.03	12 块砌 $D_{\text{炉}}=420$
		140	187	360	270	0.95	1.2	12 块砌 $D_{\text{炉}}=540$
		153	196	410	320	1.04	1.3	13 块砌 $D_{\text{炉}}=640$
		158	196	450	360	1.1	1.3	14 块砌 $D_{\text{炉}}=720$
		225	270	525	435	1.6	1.9	12 块砌 $D_{\text{炉}}=870$
		166	196	640	550	1.1	1.25	20 块砌 $D_{\text{炉}}=1100$
		168	190.8	765	675	1.2	1.37	25 块砌 $D_{\text{炉}}=1360$

## 5. 烧嘴砖

	尺 寸(mm)						每块质量(kg)		原冶金部 标号
	a	b	c	D	d	$\phi$	耐火黏土 砖	半硅砖	
	230	205	80	150	50	35	18.4	18	T-84
	340	335	120	190	75	45	49	47.5	T-85
	340	335	120	210	100	45	48.5	47.5	T-86
	340	335	130	240	125	40	43	42	T-87
	340	335	130	260	150	40	40	39	T-88

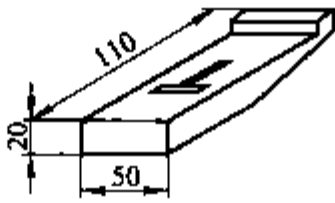
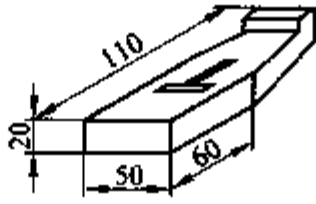
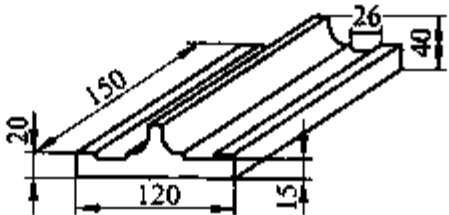
## 6. 拱脚砖(30°踵形砖)



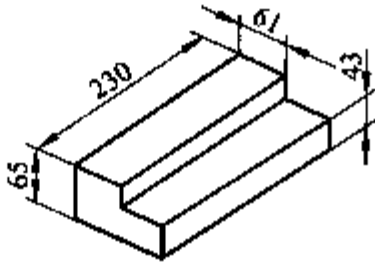
材料: 耐火黏土  
每块质量: 5 kg  
用途: 支撑拱顶

(续表)

## 7. 捆 砖

	材料: 高铝矾土 直形捆砖 每块质量: 0.2 kg 用途: 安放炉壁电热元件
	材料: 高铝矾土 扇形捆砖 每块质量: 0.175 kg 用途: 安放炉壁电热元件
	材料: 高铝矾土 炉底捆砖 每块质量: 0.8 kg 用途: 安放炉底电热元件

## 8. 轻质阶形砖

	材料: 轻质耐火黏土 每块质量: 1.8 kg 用途: 安放直形捆砖
---	--

注:  $D_{炉}$  为热处理炉内径。

## 2. 轻质耐火材料

1) 轻质耐火材料的种类 轻质耐火黏土砖、轻质氧化铝砖、轻质高铝耐火砖、煤粉灰空心微珠保温砖、硅藻土砖及硅藻土-高温耐火混合制品等。

2) 轻质耐火材料的性能 轻质耐火黏土砖的性能见表9-104。轻质氧化铝砖及高铝砖的性能见表9-107。空心微珠保温砖的性能见表9-108。硅藻土砖的性能见表9-109。

表 9-107 轻质氧化铝砖及高铝砖的性能

型 号	RQY-0.8	RQY-0.6	RQY-0.4	RQY-0.8	RQY-0.6	RQY-0.4
$\omega_{Al_2O_3}$ (%) 不小于	90	90	90	50	50	50
$\omega_{Fe_2O_3}$ (%) 不大于	0.5	0.5	0.5	2	2	2
密度( $kg/m^3$ ) 不大于	800	600	400	800	600	400
耐火度( $^{\circ}C$ ) 不低于	1800	1800	1800	1750	1750	1750
常温耐压强度(MPa) 不小于	2.0	1.0	0.6	2.0	1.0	0.6

表 9-108 空心微珠保温砖的性能

性能		数据	性能		数据
主要成分(%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.9	密度(kg/m <sup>3</sup> )	500	
	SiO <sub>2</sub>	54.3	重烧线收缩(%) (1000℃×3h)	0.3	
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.5	热扩散率(m <sup>2</sup> /s)	0.411×10 <sup>-6</sup>	
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	7.5	热导率[W/(m·℃)]	0.17+0.177×10 <sup>-4</sup> T	
耐火度(℃)		1510	常温比热容[kJ/(kg·℃)]	0.804	
荷重软化温度(℃)		1140	长期使用温度(℃)	1000	
常温耐压强度(MPa)		3.68	显气孔率(%)	68.55	

表 9-109 硅藻土制品的主要性能

制品	等级	密度(kg/m <sup>3</sup> )	显气孔率(%)	耐压强度(MPa)	热导率[W/(m·℃)]	线胀系数(10 <sup>-6</sup> /℃)	耐火度(℃)	最高使用温度(℃)
硅藻土砖	A	500	78.25	0.5	0.062+0.139×10 <sup>-3</sup> T	0.9	1280	900
	B	650	75.25	0.7	0.072+0.197×10 <sup>-3</sup> T	0.94	1280	900
	C	650	73.14	1.1	0.1+0.227×10 <sup>-3</sup> T	0.97	1280	900
硅藻土粉	生料	680	—	—	0.1+0.278×10 <sup>-3</sup> T	—	—	900
	熟料	600	—	—	0.082+0.2×10 <sup>-3</sup> T	—	—	900
硅藻土焙烧板	A	500	79.2	0.5	0.038+0.189×10 <sup>-3</sup> T	0.9	1280	900
	B	500	76.3	0.7	0.047+0.2×10 <sup>-3</sup> T	0.9	1280	900
硅藻土石棉粉	—	320	—	—	0.084	—	≤750	750

### 3. 耐火混凝土材料

耐火混凝土材料有铝酸盐水泥耐火混凝土、磷酸盐耐火混凝土、水玻璃耐火混凝土、轻质耐火混凝土、黏土质和高铝质致密耐火浇注料等。一般用于热处理炉窑的内衬、隔热保温层炉膛及炉子内衬的修补,常采用捣打、浇注、振动等施工方法成型,然后经自然干燥,低温烘烤后使用。其耐火度接近耐火制品,化学稳定性好,常温强度高,耐崩裂性好。

1) 铝酸盐水泥耐火混凝土 铝酸盐水泥耐火混凝土的材料配比和性能见表 9-110。

2) 磷酸盐耐火混凝土材料 磷酸盐耐火混凝土的材料配比和性能见表 9-111。

表 9-110 铝酸盐水泥耐火混凝土的材料配比和性能

编 号		1	2	3	4	
配 比 (%)	胶结料	矾土水泥	12~20	12	—	—
		低钙铝酸盐水泥	—	—	12~15	—
		铝-60水泥	—	—	—	15.5
	掺合料	高铝矾土熟粉	0~15	—	5~15	8.2
		铝铬渣粉	—	12	—	—
	细骨料 0.15~5 mm	高铝矾土熟料沙	30~35	—	30~35	46
		铝铬渣	—	76	—	—
	粗骨料 0.15~5 mm	高铝矾土熟料块	35~40	—	35~40	30
	水/(水泥+掺合料)		0.35~0.45	0.3	0.32~0.38	0.7
湿密度(kg/m <sup>3</sup> )		2500~2800	3000~3100	2500~2800	2550~2610	

(续表)

编 号		1	2	3	4	
主 要 性 能	荷重软化温度(°C)	开始	1 300~1 320	1 430	1 300~1 340	1 330
		变形 40%	1 380~1 420	1 640	1 400~1 440	1 420
	线胀系数( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )		4.5~6 (1 200°C)	10.15 (20~1 200°C)	4.6~6 (1 200°C)	—
	残余线变形(%)		0.2~0.5 (1 350°C)	-0.08(1 000°C) +0.64(1 400°C)	0.6~0.9 (1 400°C)	-1.0 (1 450°C)
	耐火度(°C)		1 710~1 750	>1 820	1 750~1 790	>1 770
	热导率[W/(m·°C)]		0.93~1.6 (20°C)	0.785~1.62 (20~317°C)	0.93~1.62 (20°C)	—
	混凝土标号		400~500	—	300~400	300~400
	加 热 后 耐 压 强 度 (MPa)	400°C	—	—	—	16
		500°C	30~35	32.6(600°C)	25~30	—
		800°C	—	—	—	13.5
		900°C	20~25	28.2(1 000°C)	15~20	—
		1 200°C	—	—	—	11.7
		1 300°C	15~20	—	—	—
	高 温 耐 压 强 度 (MPa)	900°C	20~25	—	15~20	—
1 300°C		10~12	—	10~15	—	
热稳定性(850°C水冷次数)		>25	—	>25	8(1 300°C)	

表 9-111 磷酸盐耐火混凝土的材料配比和性能

编 号		1	2	3	4	
配 比	胶 结 料 (外 加)	磷酸(%)	6.5~12	6.5~18	—	10~12
		浓度(%)	60	40~60	—	波美度 45
		磷酸铝(%)	—	—	6.5~14	—
		浓度(%)	—	—	~10	—
	促凝剂	钒土水泥(%)	—	—	—	2
	骨 料 及 掺 合 剂	锆英石 <0.3 mm	—	—	—	—
		<0.038 mm	50	—	—	—
		钒土熟料 10~5 mm	—	—	—	45
		5~1.2 mm	—	30~40	30~40	25
	<1.2 mm	—	35~40	35~40	25	
湿密度(kg/m <sup>3</sup> )		3 420	2 700	—	2 480(干密度)	

(续表)

编 号		1	2	3	4	
主 要 性 能	重荷软化温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	开始	1 450~1 400	1 300~1 350	1 300~1 350	1 460
		变形 40%	1 550~1 620	1 400~1 530	1 400~1 500	1 620
	热稳定性(1 200 $^{\circ}\text{C}$ 水冷次数)		>20	50~60	>20	—
	线胀系数( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )		3.9~4.1	5.0~6.8	—	—
	1 400 $^{\circ}\text{C}$ 残余线变形(%)		0.2~0.4	-0.1~+1.0	—	—
	耐火度( $^{\circ}\text{C}$ )		>1 800	>1 800	—	>1 700
	加热后耐压强度 (MPa)	1 200 $^{\circ}\text{C}$	30~40	30~40	40~50	—
		1 400 $^{\circ}\text{C}$	40~50	30~40	40~43	—
	高温耐压强度 (MPa)	1 200 $^{\circ}\text{C}$	>20	6~13	—	—
		1 350 $^{\circ}\text{C}$	—	10~13	5~7	—
混凝土标号		400~500	300~400	400~500	—	

注: 1. 磷酸盐溶液用 50%浓度的工业磷酸与工业氢氧化铝按重量比 7:1 调制。

2. 矾土熟料成分应为  $\text{Al}_2\text{O}_3 > 60\%$ ,  $\text{SiO}_2 < 20\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 3\%$ ; 锆英石化学成分应为:  $\text{ZrO}_2 > 64\%$ ,  $\text{SiO}_2 < 32\%$ 。

3. 混凝土应烘干除水分, 碱性耐火材料用磷酸胶结时可不烘干。酸性、中性耐火材料用磷酸胶结时, 立即于 350~450 $^{\circ}\text{C}$  烘干, 预制块烘干后即可使用。

3) 黏土质和高铝质致密耐火浇注料 耐火浇注料由耐火材料和结合剂组成, 加入或其他液体调配后经浇注、振动、捣打施工成型, 不需加热即可凝固硬化。黏土质和高铝质致密耐火浇注料理化指标见表 9-112。

表 9-112 黏土质和高铝质致密耐火浇注料理化指标

分 类	黏土结合耐火浇注料			水泥结合耐火浇注料					
	NL-70	NL-60	NN-45	GL-85	GL-70	GL-60	GN-50	GN-42	
牌 号	NL-70	NL-60	NN-45	GL-85	GL-70	GL-60	GN-50	GN-42	
$\omega_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ (%) 不小于	70	60	45	85	70	60	50	42	
$\omega_{\text{CaO}}$ (%) 不大于	—	—	—	—	—	—	—	—	
耐火度( $^{\circ}\text{C}$ ) 不低于	1 760	1 720	1 700	1 780	1 720	1 700	1 660	1 640	
最高使用温度( $^{\circ}\text{C}$ )	1 450	1 400	1 350	1 600	1 450	1 400	1 350	1 300	
烧后线变化率[不大于 $\pm 1\%$ 的试验温度( $^{\circ}\text{C}$ )](保温 3h)	1 450	1 400	1 350	1 500	1 450	1 400	1 400	1 350	
(110 $\pm 5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 烘干后	耐压强度(MPa) 不小于	10	9	8	35	35	30	30	25
(110 $\pm 5$ ) $^{\circ}\text{C}$ 烘干后		抗弯强度(MPa) 不小于	2	1.5	1	5	5	4	4
分 类	低水泥结合耐火浇注料		磷酸盐结合耐火浇注料			水玻璃结合耐火浇注料			
牌 号	DL-80	DL-60	LL-75	LL-60	LL-45	BN-40			
$\omega_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ (%) 不小于	80	60	75	60	45	40			
$\omega_{\text{CaO}}$ (%) 不大于	2.5	2.5	—	—	—	—			
耐火度( $^{\circ}\text{C}$ ) 不低于	1 780	1 740	1 780	1 740	1 700	—			
最高使用温度( $^{\circ}\text{C}$ )	1 500	1 450	1 600	1 500	1 400	1 000			



(续表)

分 类		低水泥结合耐火浇注料		磷酸盐结合耐火浇注料			水玻璃结合耐火浇注料
牌 号		DL-80	DL-60	LL-75	LL-60	LL-45	BN-40
烧后线变化率[不大于±1%的试验温度(°C)](保温3h)		1500	1500	1500	1450	1350	1000
(110±5)°C 烘干后	耐压强度(MPa) 不小于	40	30	30	25	20	20
(110±5)°C 烘干后	抗弯强度(MPa) 不小于	6	5	5	4	3.5	—

#### 4. 耐火纤维材料

耐火纤维又称陶瓷纤维,热导率小,质量轻,热容量小,耐急冷急热,耐酸碱,绝缘,抗热振,使用温度为1150~1700°C,一般用作绝热层,有良好的节能效果,但不能承受炉气冲刷,不能承受载荷。

## 二、保温材料

保温材料用作炉衬主要是起到减少炉壁的散热量和炉子的热损失、保持炉子的使用温度的作用,因此要求保温材料具备较低的热导率及热容量、较小的密度、一定的耐火度和使用温度。常用的绝热保温材料有:硅藻土、蛭石、浮石、石棉制品、矿渣棉及岩棉制品等。

### 1. 硅藻土

硅藻土的主要成分是非晶体的二氧化硅。可制成硅藻土粉,烧结成硅藻土砖或制成其他硅藻土制品。硅藻土砖的性能指标及硅藻土制品的主要性能见表9-112。

### 2. 蛭石

蛭石俗称黑云母或金云母,主要成分为 $\text{SiO}_2$ 及 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 等,熔点为1300~1370°C,用于保温,常直接倒入炉壳和炉衬之间,也可制成蛭石制品。蛭石的主要性能见表9-113。

表9-113 蛭石的主要性能

性 能		密 度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	允许使用温度(°C)	热导率[ $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ]	粒径(mm)
等级	I级	0.1	1000	0.065~0.05	2.5~20
	II级	0.2	1000	0.045~0.05	2.5~20
	III级	0.3	1000	0.045~0.05	2.5~20

### 3. 石棉及石棉制品

石棉在高温下不燃烧,但500°C时强度开始降低,700~800°C变脆失去绝热性能。石棉的热导率较低,常作为绝缘填料。石棉可制成板状、绳状或粉状制品。石棉制品的主要性能见表9-114。

表9-114 石棉制品的主要性能

制 品	密 度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	热导率[ $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ ]	允许使用温度(°C)
石棉粉	340	$0.087+0.24\times 10^{-3}T$	500~600
石棉板	900~1000	$0.16+0.17\times 10^{-3}T$	500
石棉绳	800	$0.2+0.18\times 10^{-3}T$	300~400
石棉硅藻土涂料	650	—	900

### 4. 岩棉制品

岩棉制品的主要性能见表9-115。

表 9-115 岩棉制品的主要性能

性能	密度(kg/m <sup>3</sup> )	长度(mm)	宽度(mm)	内径(mm)	使用密度(kg/m <sup>3</sup> )	热导率[W/(m·℃)]	
						温度范围(℃)	计算公式
岩棉板	50、80、100、120、150、200	1 000	630		100~200	50~350	$0.35+0.00018T$
岩棉缝毡	50、80、100	3 000	910		100~120	50~600	$0.028+0.00023T$
岩棉保温带	100	2 400	910		100~120	50~250	$0.043+0.00015T$
岩棉管壳	120~150	910		18~324	120~150	50~350	$0.36+0.00012T$
岩棉保温条	100	2 400	100~180				

## 5. 矿渣棉

矿渣棉是用熔融的冶金矿渣制成的矿物纤维,密度小、热导率低、吸湿性差且不燃烧,一般用做保温材料。矿渣棉的性能见表 9-116。

表 9-116 矿渣棉的性能

技术指标	等级		
	一级	二级	三级
密度(kg/m <sup>3</sup> ) 不大于	125	150	200
小球含量(>0.5 mm)(体积分数,%) 不大于	7	12	20
纤维平均直径(μm) 不大于	10	10	10
常温热导率[W/(m·℃)] 不大于	0.045	0.046	0.052
烧结温度(℃) 不小于	700	700	700
含水量(质量分数,%) 不大于	2	2	2
沥青或矿物油含量(质量分数,%) 不大于	1	1	1
酸性系数 $[(w_{SiO_2} + w_{Al_2O_3}) / (w_{CaO} + w_{MgO})]$ 不小于	0.9	0.9	0.9
纤维含量(质量分数,%) 不大于	70	60	50

## 6. 膨胀珍珠岩制品

膨胀珍珠岩的主要成分是 SiO<sub>2</sub>(质量分数约占 70%),可制成其他制品,可作为一种轻质保温材料,具有密度小、耐火度高、热导率低的特点,其绝热性能优于硅藻土。

## 7. 硅酸钙绝热板

硅酸钙绝热板密度小、耐高温、不含石棉、比强度高,是一种良好的保温材料。表 9-117 是 HCS 硅酸钙绝热板的物理性能。

表 9-117 HCS 硅酸钙绝热板的物理性能

物理性能	HCS 型			ASTMC533-80NC2 (美国材料试验协会)	JISA9510-84NOI-22 (日本工业标准)
	HCS-20	HCS-23	HCS-22		
密度(kg/m <sup>3</sup> )	200(±10%)	230(±10%)	220(±15%)	≤240	≤220
抗折强度(MPa)	≥0.4	≥0.5	≥0.4	≥0.31	≥0.29
热导率 [W/(m·℃)]	<0.050 +0.00011T	<0.056 +0.00011T	<0.056 +0.00011T	<0.095 (204℃)	<0.062 (75±5)℃

(续表)

物理性能	HCS 型			ASTM C533-80NO2 (美国材料试验协会)	JISA9510-84NO1-22 (日本工业标准)
	HCS-20	HCS-23	HCS-22		
最高使用温度(°C)	1050	1050	850	982	1000
重绕线变化(%)	<1.5 (1000°C, 3h)	<1.5 (1000°C, 3h)	<1.5 (800°C, 3h)	—	<2.0 (1000°C, 3h)
	<2.0 (982°C, 24h)	<2.0 (982°C, 24h)	<2.0 (850°C, 24h)	<2.5 (982°C, 24h)	—

### 三、耐热构件用金属材料

热处理设备中不少零部件常需要耐热构件,一般采用耐热钢、耐热铸铁和合金结构钢制作,这些材料提高了热处理设备的刚性、强度和使用寿命。

#### 1. 热处理炉常用的耐热钢(表 9-118)

表 9-118 热处理炉常用的耐热钢

钢 号	允许工作温度(°C)	用 途	钢 号	允许工作温度(°C)	用 途
Cr3Si	600~750	坩埚、炉底板、 导轨、料盘等	45Cr14Ni14W2Mo	850~950	炉罐, 风扇叶, 轴类, 输送带, 炉 底板等
12Cr5Mo	650~750		Cr25Si2	950~1000	
15Al3MoWTi	600		1Cr25Si2	950~1000	
Cr6SiMo	700~800		3Cr18Ni25Si2	1000~1050	
42Cr9Si2	800~900		1Cr25Ni25Si2	~1200	
40Cr10Si2Mo	850~950		14Cr23Ni18	1000~1050	
Cr13, Cr13Si3, Cr20Si3	850~1000		Cr25Ni12	~1000	
Cr17Al4Si	1000~1100		06Cr25Ni20	1050~1150	
Cr24Al2Si	1000~1050		Cr20Mn9Si2N	950~1050	
Cr25, Cr25Ti	900~1000		Cr24Ni7N	1050~1200	
Cr17Mn13N	950~1050	炉罐, 风扇叶, 轴 类, 输送带, 炉底板	Mn19Al6Cr5SiMo	1050~1100	
2Cr20Mn9Si2N	950~1050		Cr28Ni48W6	~1200	

#### 2. 热处理炉常用的耐热铸钢(表 9-119)

表 9-119 热处理炉常用的耐热铸钢

牌 号	力 学 性 能				特 性 和 用 途
	屈服强度 $R_{p0.2}$ (MPa)	抗拉强度 $R_m$ (MPa)	断后伸长率 $A_5$ (%)	最高使用 温度(°C)	
ZG40Cr9Si2	235	490	8	1150	抗氧化最高温度 800°C, 长期工作的受载荷工件的温度应低于 700°C。用于坩埚、炉门等构件
ZG30Cr18Mn12Si2N	235	440	8	1150	高温强度和抗疲劳性较好, 用于炉罐和炉底板、料筐、转送带导轨、支承架等炉用构件

(续表)

牌 号	力 学 性 能				特 性 和 用 途
	屈服强度 $R_{p0.2}$ (MPa)	抗拉强度 $R_m$ (MPa)	断后伸长率 $A_5$ (%)	最高使用 温度(°C)	
ZG35Cr24Ni7SiN	245	450	8	1 150	抗氧化性好,用于炉罐、炉辊、通风机叶片、炉滑轨、炉底板、玻璃水泥窑等构件
ZG30Cr26Ni5	195	390	5	1 100	承载使用温度可达 650°C,轻负荷时可达 1 050°C,用于矿石焙烧炉和不需要高温强度的高硫环境下工作的炉用构件
ZG30Cr20Ni10	195	440	13	1 150	基本不形成 $\sigma$ 相,可用于炼油厂加热水泥干燥窑、矿石焙烧炉和热处理炉构件
ZG35Cr26Ni12	235	440	5	1 150	高温强度高,抗氧化性好,广泛用于多种类型炉子构件
ZG40Cr28Ni16	235	490	8	1 150	具有较高温度的抗氧化性能,用途同 ZG40Cr25Ni20
ZG40Cr25Ni20	235	440	8	1 150	具有较高的蠕变和持久强度,抗高温气体腐蚀能力强,常用于制造炉辊及需要较高蠕变强度的零件
ZG40Cr30Ni20	245	450	8	1 150	在高温含硫气体中耐腐蚀性好,用于气体分离装置及焙烧炉衬板
ZG35Ni24Cr18Si2	195	390	5	1 100	用于加热炉转送带、螺杆、紧固件等高温承载零件
ZG30Ni35Cr15	195	440	13	1 150	抗疲劳性好,用于渗碳炉构件、热处理炉炉底板、导轨、蒸馏器、辐射管及周期加热的紧固件
ZG45Ni35Cr26	235	440	5	1 150	抗氧化及抗渗碳性良好,高温强度高,用于乙烯裂解管、炉辊以及热处理用夹具等

注: 1. 本表适用于普通工程用耐热铸钢件,不包括特殊用途的耐热铸钢件。

2. 铸件的力学性能一般不作为验收项目,只有在合同中明确提出时,测定项目应符合表中要求。

3. 除 ZG40Cr9Si2 需进行 950°C 退火外,其余牌号铸件均可不经热处理,以铸态交货。

#### 四、电热材料与电热元件

##### 1. 金属电热材料和金属电热元件

##### 1) 金属电热材料

(1) 常用金属电热材料及其性能特点见表 9-120。

表 9-120 常用金属电热材料及其性能特点

常用金属电热材料	牌 号	性 能 特 点
镍铬合金	Cr15Ni60 Cr20Ni80 Cr20Ni80Ti3 0Cr23Ni13 0Cr25Ni20	1) 易于加工和焊接 2) 电阻率大,电阻温度系数小,功率稳定 3) 易于与硫反应生成硫化镍,产生晶间腐蚀 4) 高温下(>1 000°C)在渗碳气氛中会渗碳,产生裂纹 5) 在含氢气 15% 的吸热气氛中使用温度为 930~115°C 6) 在含一氧化碳的气氛中,使用温度应 ≤1 000°C

(续表)

常用金属电热材料	牌 号	性 能 特 点
铁铬铝合金	Cr13Al4 Cr17Al5 0Cr25Al5 0Cr24Al6RE 0Cr13Al6Mo2 0Cr27Al7Mo2	1) 空气中会高温氧化生成氧化铝保护膜 2) 电阻率大,电阻温度系数小,高温强度低 3) 质地脆,不易加工,维修较困难 4) 与氧化铁及酸性耐火材料反应,性能变差 5) 在氮气中使用将降低抗氧化性 6) 可在含硫的氧化性气氛中使用 7) 渗碳气氛中使用会表面渗碳
铂		1) 耐高温,高温力学性能好 2) 电阻率低,电阻温度系数大 3) 空气中在较高温度下易氧化及升华(>700℃) 4) 在真空、惰性气氛中耐高温 5) 铂与水蒸气、二氧化硫、氧化氮、氧化亚氮发生氧化反应 6) 强度高,加工性差
钨		1) 耐高温,高温力学性能好 2) 电阻率小,电阻温度系数大 3) 高温时在空气中会氧化,>1200℃开始挥发 4) 1300℃时在渗碳气氛中与碳反应生成碳化物 5) 适宜在真空及惰性气体中使用 6) 加工性能差,焊接须在真空或保护气氛下进行
钼		1) 最高使用温度可达2300℃ 2) 电阻率高于金属铂和钨 3) 加工性能好,能加工各种形状 4) 焊接应在真空或保护气氛下进行 5) 适宜在惰性气体或真空度 $\leq 1.33 \times 10^{-2}$ Pa的环境下工作

(2) 金属电热材料的电阻率见表9-121。

表9-121 金属电热材料在不同温度下的电阻率

 $(\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m})$ 

温度(℃)	Cr15Ni60	Cr20Ni80	Cr13Al5	0Cr13Al6Mo2	0Cr25Al5	0Cr27Al7Mo2	0Cr24Al6RE	0Cr21Al6Ni6	铂	钨	钼棒
20	1.100	1.110	1.260	1.400	1.400	1.500	1.45	1.43	0.054	0.056	0.25
100	1.114	1.117	1.265	1.401	1.403	1.496	1.45	1.43	0.074	0.074	0.35
200	1.132	1.128	1.276	1.402	1.410	1.491	1.45	1.43	0.100	0.09	0.0
300	1.151	1.137	1.294	1.410	1.418	1.488	1.45	1.43	0.126	0.126	0.65
400	1.168	1.144	1.312	1.420	1.431	1.486	1.45	1.43	0.125	0.154	0.83
500	1.181	1.149	1.336	1.439	1.450	1.489	1.465	1.444	0.179	0.184	1.02
600	1.180	1.139	1.373	1.467	1.478	1.498	1.479	1.459	0.205	0.213	1.24
700	1.191	1.131	1.404	1.474	1.488	1.489	1.479	1.459	0.232	0.243	1.46
800	1.198	1.129	1.419	1.481	1.494	1.489	1.494	1.473	0.258	0.273	1.70
900	1.207	1.133	1.430	1.484	1.502	1.489	1.494	1.473	0.284	0.303	1.94
1000	1.216	1.414	1.439	1.489	1.506	1.489	1.508	1.487	0.314	0.335	2.20

(续表)

温度(°C)	Cr15Ni60	Cr20Ni80	Cr13Al5	0Cr13Al6Mo2	0Cr25Al5	0Cr27Al7Mo2	0Cr24Al6RE	0Cr21Al6N6	钼	钨	硅钼棒
1100		1.125		1.493	1.511	1.489	1.508	1.487	0.344	0.365	2.44
1200				1.499	1.512	1.490	1.508	1.487	0.374	0.396	2.70
1300						1.490	1.508	1.487	0.404	0.428	2.96
1400							1.523	1.502	0.453	0.461	3.21
1600									0.496	0.527	3.73
1700									0.526	0.559	4.00

(3) 金属电热材料在气氛中的使用温度见表 9-122。

表 9-122 金属电热材料在气氛中的使用温度

金属电热材料	在气氛中的长期使用温度(°C)							
	空气	还原气氛氢 或分解氨	含氢 15% (体积分数)的 放热性气氛	一氧化碳 吸热性 气氛	渗碳 气氛	含硫的氧 化性或还 原性气氛	含铝锌 的还原 性气氛	真空
Cr20Ni80	<1150	<1180	<1120	<1010	不 <sup>①</sup>	不	不	<1150
Cr15Ni60	<1010	<1010	<1010	<930	不	不	不	<1010
Cr20Ni35, 余为 Fe	<930	<930	<930	<870	不	<930	<930	
Cr23Al5Co1, 余为 Fe	<1150	<1150 <sup>②</sup>	不	不	不	含硫氧化性 气氛可用	不	
Cr37%, Al75%, 余为 Fe	<1320	<1290 <sup>②</sup>	不	不	不	含硫氧化性 气氛可用	不	
0Cr25Al5A	1300(干空气) 1100(湿空气)	1300(氢) 1100(分解氨)	1100	1000				
0Cr24Al6RE	1400(干空气) 1200(湿空气)	1400(氢) 1200(分解氨)	1150	1050				
Mo	不 <sup>③</sup>	<1650	不	不	不	不	不	<1650
W	不	氢气中 <2480	不	不	不	不	不	2000
碳化硅	<1450	<1200	<1370	<1370	不	<1390	<1370	不
石墨	不	<2480	不	<2480	<2480	含硫气 氛可用	<2480	2000

注: 表内“不”字表示完全不能应用。

① 表面经陶瓷材料镀层处理后可以应用。

② 使用前需经过氧化处理。

③ 表面镀 MoS<sub>2</sub>后可以使用。

(4) 常用合金电热材料的性能见表 2-51。

(5) 电热材料与耐火材料的反应温度见表 9-123。

表 9-123 电热材料与耐火材料的反应温度

(℃)

材料	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BeO	MgO	ThO <sub>2</sub>	ZrO <sub>2</sub>	黏土砖	碱性耐火材料	石墨
钨	1 900	1 900 <sup>①</sup>	1 600 <sup>①</sup>	1 900 <sup>①</sup>	2 200 烧结	1 200	1 600	1 200℃ 以上生成碳化物
钨	2 000 <sup>①</sup>	2 000 <sup>①</sup>	2 000 <sup>①</sup>	2 200 <sup>①</sup>	1 600 <sup>①</sup>	1 300	1 600	1 400℃ 以上生成碳化物
钼	1 900	1 600	1 800	1 900	1 600	1 200	1 200	1 000℃ 以上生成碳化物


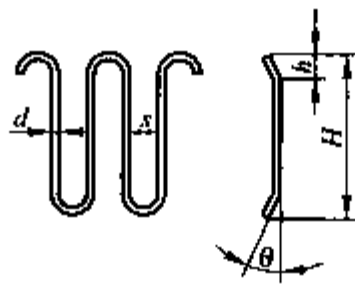
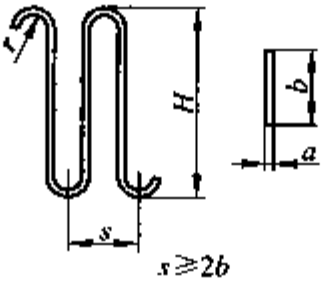
注：① 真空度为  $1.3 \times 10^{-2}$  Pa 时比表中数据低 100~200℃。

2) 金属电热元件

(1) 线状与带状电热元件。

① 线状与带状电热元件的结构及尺寸见表 9-124。

表 9-124 几种电热元件的结构关系尺寸

结构形式	关系尺寸						
		元件材料	下列温度(℃)时的 D/d 值				
<1 000			1 100	1 200	1 300		
铁铬铝		6~8	5~6	5	5		
镍铬	6~9	6~9	5~6				
	$h = \left( \frac{1}{4} \sim \frac{1}{6} \right) H$ <p><math>S &gt; 6d, \theta = 10^\circ \sim 20^\circ</math>                      镍铬合金: <math>H = 200 \sim 300</math> mm                      铁铬铝合金: <math>H = 150 \sim 250</math> mm</p>						
	安装方式	电阻带宽度 b (mm)	H 最大值(mm)				
			镍 铬		铁 铬 铝		
	元件温度(℃)		元件温度(℃)				
			1 100	1 200	1 100	1 200	1 300
	悬 挂	10 20 30	300 400 450	200 300 350	250 270 420	150 230 280	130 200 250
水平放置	10 20 30	200 270 320	160 220 270	180 250 300	140 175 200	120 150 170	

② 金属电热元件的单位表面负荷值见表 2-56。

③ 金属电热元件的尺寸在确定功率、电压、电热元件的联接方式以及电热材料后可按表 2-57 进行尺寸计算。

(2) 管状电热元件。

① 管状电热元件由金属管、螺旋状电阻丝与导热性绝缘性良好的填料组成,其结构见图 9-44。

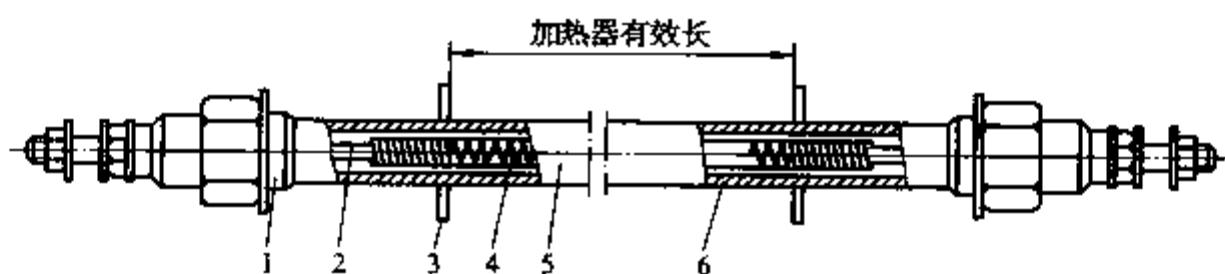


图 9-44 管状电热元件示意图

1—管端封口；2—引出棒；3—垫圈；4—电阻丝；5—金属管；6—绝缘填料

### ② 管状电热元件的型号和技术性能。

GYXY1-3 型与 GYJ1-3 型管状电热元件：GYXY1-3 型管状电热元件采用不锈钢金属管可用于 550℃ 及以下的硝酸盐。GYJ1-3 型采用低碳钢(10 钢)金属管,用于 450℃ 以下的盐浴炉。两种加热元管的形状尺寸和技术性能相同。GYXY、GYJ 型电热元件电压均为 380 V,功率 2~7 kW。

JGY 型和 JGY-3 型管状电热元件：主要用于传热性好的液体介质的加热,加热温度较低,JGY 型最高工作温度不大于 300℃,JGY3 型最高工作温度不超过 100℃,所以一般用作水和油的加热。JGY 型管状电热元件电压 220 V,功率 2~8 kW。

### (3) 辐射管。

① 辐射管的种类与用途：辐射管按热源不同有电热辐射管和火焰加热辐射管两类,主要用于可控气氛炉及其他有腐蚀性气体的工业炉。

② 电热辐射管的结构形式和性能：电热辐射管的结构有单根螺旋加热式、多根螺旋加热式和电阻带加热器式。电热辐射管的性能见表 9-125。

表 9-125 电热辐射管的性能

辐射管形式	单螺旋加热器		多螺旋加热器	电阻带加热器
电热体材料	0Cr25Al5	Cr20Ni80	0Cr25Al5	0Cr25Al5
电热体直径(或长×宽)(mm)	φ4~8	φ4~8	φ5	2.5×30
工作电压(V)	220/380	220/380	220	28~31(四挡变压器)
电热体表面功率(W/cm <sup>2</sup> )	1.5~1.55	1.8~1.9	1.4~1.5	1.6~1.95
辐射管表面功率(W/cm <sup>2</sup> )	1.5~2.0	1.5~2.0	最高 2.26	1.6~2.0
辐射管功率(kW)	8~12	8~12	10~14	12.6~15.5
辐射管体材质	Cr18Ni25Si2, Cr23Ni18, 0Cr18Ni13Si4, 1Cr20Ni14Si2, 1Cr25Ni20Si2, 0Cr18Ni25, 3Cr18Mn12Si2N			
管壁厚度(mm)	4~8			
管体外径(mm)	100~150			
辐射管长度(mm)	一般有效长度 1000~1700			

## 2. 非金属电热材料和非金属电热元件

常用非金属电热材料有碳化硅材料、硅钼电热材料及石墨电热材料三种。非金属电热材料制成的电热元件主要用于高温电阻炉、真空炉和保护气氛炉。

### 1) 碳化硅电热材料与电热元件

(1) 碳化硅电热材料：碳化硅熔点为 2227℃,耐高温、变形小、耐急冷急热、有良好的化学稳定性、不与酸起反应,但硬而脆、电阻系数大、使用过程中易老化,使用时要配备调压器。碳化硅电热材料的主要性能见表 9-126;碳化硅电热体的电阻率见表 9-127。



表 9-126 碳化硅电热材料的主要性能

最高工作温度(°C)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	热导率 W/(m·°C)	比热容 kJ/(kg·°C)	电阻率 (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	热胀系数(20~1500°C) (10 <sup>-6</sup> /°C)	抗拉强度 (MPa)	抗弯强度 (MPa)
1500	3~3.2	23.26	0.71	1000~2000	5	39.2~49	70~90

表 9-127 碳化硅电热体的电阻率

温度(°C)	电阻率 (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	温度(°C)	电阻率 (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	温度(°C)	电阻率 (Ω·mm <sup>2</sup> /m)	温度(°C)	电阻率 (Ω·mm <sup>2</sup> /m)
20	3700	400	1320	800	1000	1200	1050
100	2400	500	1200	900	980	1300	1200
200	1802	600	1050	1000	1000	1400	1320
300	1600	700	1020	1100	1020	1500	1450

(2) 碳化硅电热元件：碳化硅电热元件有棒状和管状两种。

① 碳化硅棒电热元件(图 9-45)：其常用单位表面功率见表 9-128。

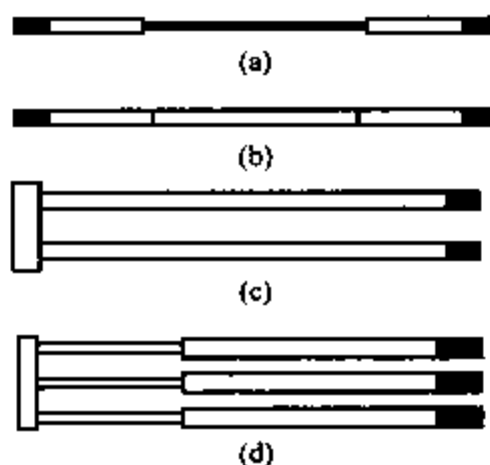


图 9-45 硅碳棒电热元件外形

(a) 端头加粗式硅碳棒；(b) 等直径硅碳棒；  
(c) 凹形；(d) 山字形

表 9-128 硅碳棒电热元件常用单位表面功率

(W/cm<sup>2</sup>)

元件温度(°C)	炉温(°C)														
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
500	1.75	1.69	1.54	1.25	0.76										
600	2.87	2.81	2.65	2.36	1.88	1.12									
700	4.46	4.39	4.23	3.94	3.46	2.70	1.58								
800	6.62	6.56	6.40	6.11	5.63	4.87	3.75	2.17							
900	9.42	9.36	9.20	8.91	8.43	7.87	6.55	4.97	2.8						
1000	13.10	13.04	12.88	12.50	12.11	11.35	10.23	8.65	6.48	3.68					
1100	17.72	17.66	17.50	17.21	16.73	15.88	14.85	13.27	11.10	8.30	4.62				
1200	23.51	23.45	23.23	23.00	22.52	21.74	20.64	19.06	16.83	14.09	10.41	5.79			
1300	30.57	30.51	30.35	30.06	29.58	28.82	27.70	26.12	23.35	21.15	17.47	12.85	7.05		
1400	39.12	39.06	38.90	38.61	38.13	37.28	36.25	34.67	32.50	29.70	26.02	21.40	15.61	8.55	
1500	49.37	49.31	49.16	48.86	48.38	47.62	46.50	44.93	42.78	39.95	36.27	31.65	25.88	18.74	10.23

② 碳化硅管状电热元件(图 9-46): 其标准电阻及发热面积见表 9-129。

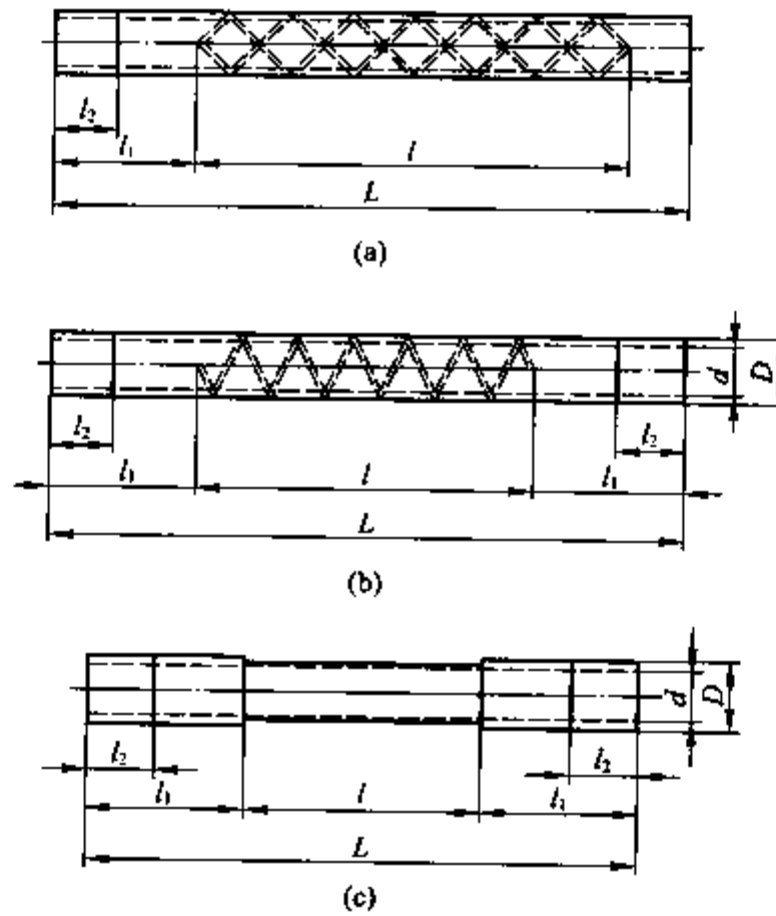


图 9-46 碳化硅管状电热元件的外形尺寸

(a) 一端接线; (b) 两端接线; (c) 两端接线无螺纹;  
 $L$ —硅碳管全长;  $l$ —发热段长度;  $l_1$ —冷段长度;  $l_2$ —喷铝段长度;  
 $D$ —管外径;  $d$ —管内径

表 9-129 碳化硅管标准电阻及发热面积

序号	发热段尺寸 (mm)		1400℃设计标准电阻(Ω)			发热段表面积 (mm)	序号	发热段尺寸 (mm)		1400℃设计标准电阻(Ω)			发热段表面积 (mm)
	外径/内径	长度	单螺纹	双螺纹	无螺纹			外径/内径	长度	单螺纹	双螺纹	无螺纹	
1	40/30	200	6	7.5	0.35	251	14	70/60	400	5.5	7	0.45	879
2	40/30	300	6.5	8	0.45	377	15	70/60	500	6	7.5	0.55	1100
3	40/30	400	7	8.5	—	503	16	70/60	600	6.5	8	—	1320
4	50/40	200	5.5	7	0.35	314	17	70/60	700	7	8.5	—	1540
5	50/40	300	6	7.5	0.45	471	18	70/60	800	7.5	—	—	1758
6	50/40	400	6.5	8	0.55	628	19	70/60	900	8	—	—	1978
7	50/40	500	7	8.5	—	785	20	70/60	1000	8.5	—	—	2193
8	60/50	200	5	6.5	—	377	21	80/70	300	5	6	—	754
9	60/50	300	5.5	7	0.35	565	22	80/70	400	5.5	6.5	—	1005
10	60/50	400	6	7.5	0.45	754	23	80/70	500	6	7	—	1256
11	60/50	500	6.5	8	0.55	943	24	80/70	600	6.5	7.5	—	1510
12	60/50	600	7	8.5	—	1130	25	80/70	700	7	8	—	1760
13	70/60	300	5	6.5	0.35	659	26	80/70	800	7.5	8.5	—	2010

(续表)

序号	发热段尺寸 (mm)		1400℃设计标准电阻(Ω)			发热段表面积 (mm <sup>2</sup> )	序号	发热段尺寸 (mm)		1400℃设计标准电阻(Ω)			发热段表面积 (mm <sup>2</sup> )
	外径/内径	长度	单螺纹	双螺纹	无螺纹			外径/内径	长度	单螺纹	双螺纹	无螺纹	
27	80/70	900	8	—	—	2 261	36	90/80	1 000	8.5	—	—	2 826
28	80/70	1 000	8.5	—	—	2 512	37	100/90	300	5	6	—	924
29	90/80	300	5	6	—	848	38	100/90	400	5.5	6.5	—	1 256
30	90/80	400	5.5	6.5	—	1 130	39	100/90	500	6	7	—	1 570
31	90/80	500	6	7	—	1 413	40	100/90	600	6.5	7.5	—	1 885
32	90/80	600	6.5	7.5	—	1 695	41	100/90	700	7	8	—	2 200
33	90/80	700	7	8	—	1 980	42	100/90	800	7.5	8.5	—	2 510
34	90/80	800	7.5	8.5	—	2 260	43	100/90	900	8	—	—	2 826
35	90/80	900	8	—	—	2 543	44	100/90	1 000	8.5	—	—	3 410

2) 硅钼电热材料与电热元件

(1) 硅钼电热材料：硅钼电热材料耐高温，工作温度可达 1 200~1 650℃；在氧化性气氛中硅钼电热材料表面会形成致密的二氧化硅保护膜，所以具有相当的抗氧化腐蚀能力；在室温时硬而脆，但在高于 1 350℃时会变软，有延展性；在 400~700℃之间易发生低温氧化，应避免在此温度区工作；耐急冷急热，电阻温度系数大，需要使用时应配备调压器；适于在空气及惰性气体气氛中使用，使用寿命长。

(2) 硅钼电热元件(图 9-47)：硅钼电热元件在各种气氛中的最高使用温度见表 9-130，在真空中的最高使用温度见图 9-48，其电阻特性见图 9-49。硅钼电热元件允许的最大单位表面功率见图 9-50。

表 9-130 硅钼电热元件在各种气氛中的最高使用温度

气 氛	He、Ar、Ne	C <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	NO	NO <sub>2</sub>
最高使用温度(℃)	1 650	1 700	1 500	1 650	1 700
气 氛	CO	CO <sub>2</sub>	湿气、露点(10℃)	干 H <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
最高使用温度(℃)	1 500	1 700	1 400	1 350	1 600

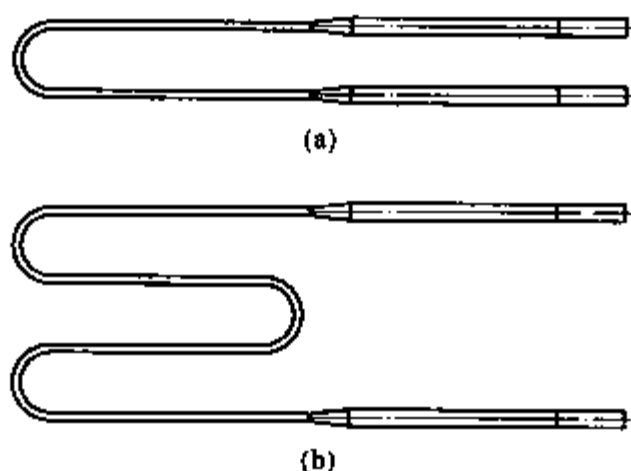


图 9-47 硅钼电热元件外形  
(a) U形；(b) W形

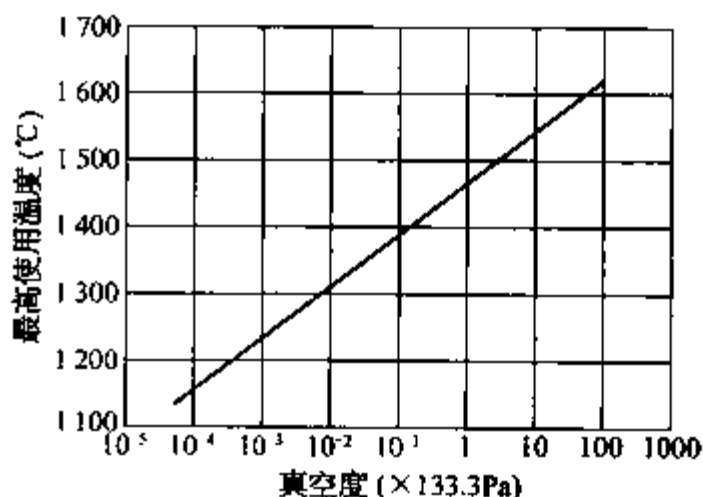


图 9-48 硅钼电热元件在真空中的最高允许温度

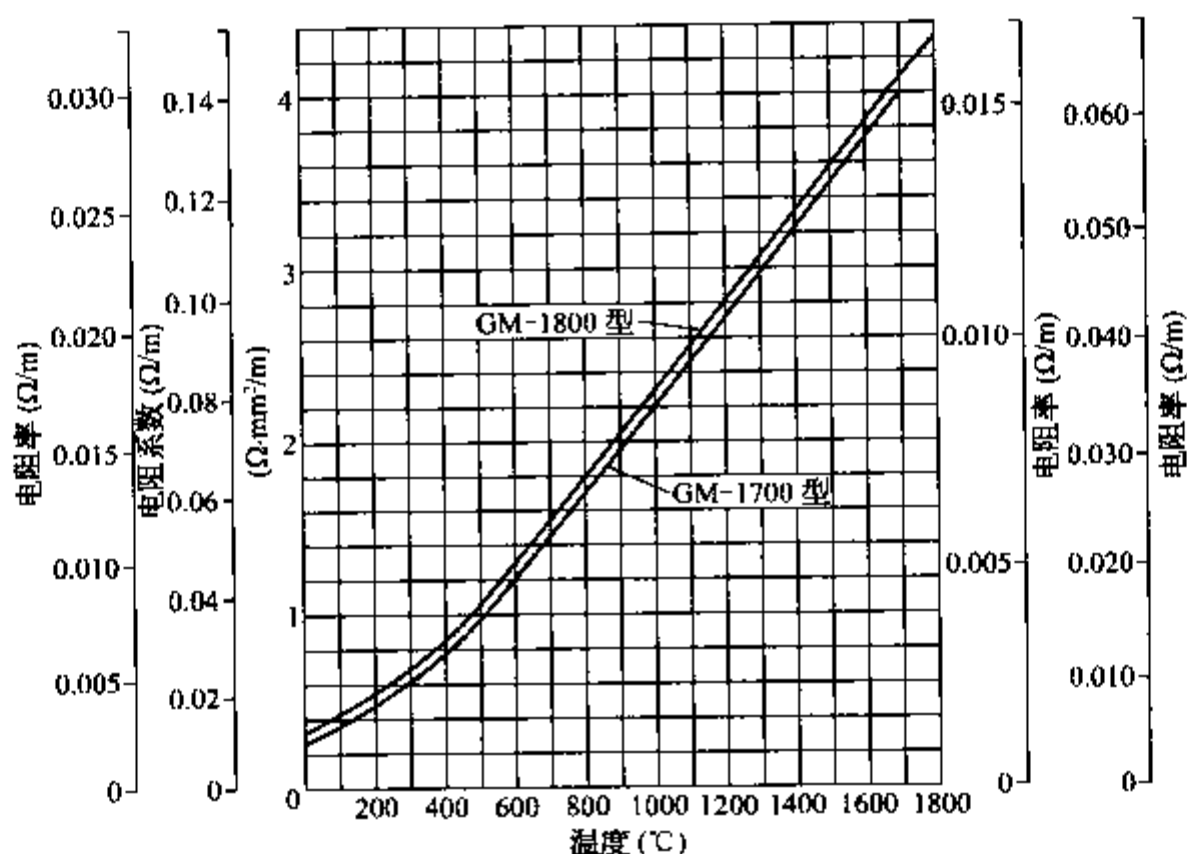


图 9-49 硅钼电热元件的电阻特性

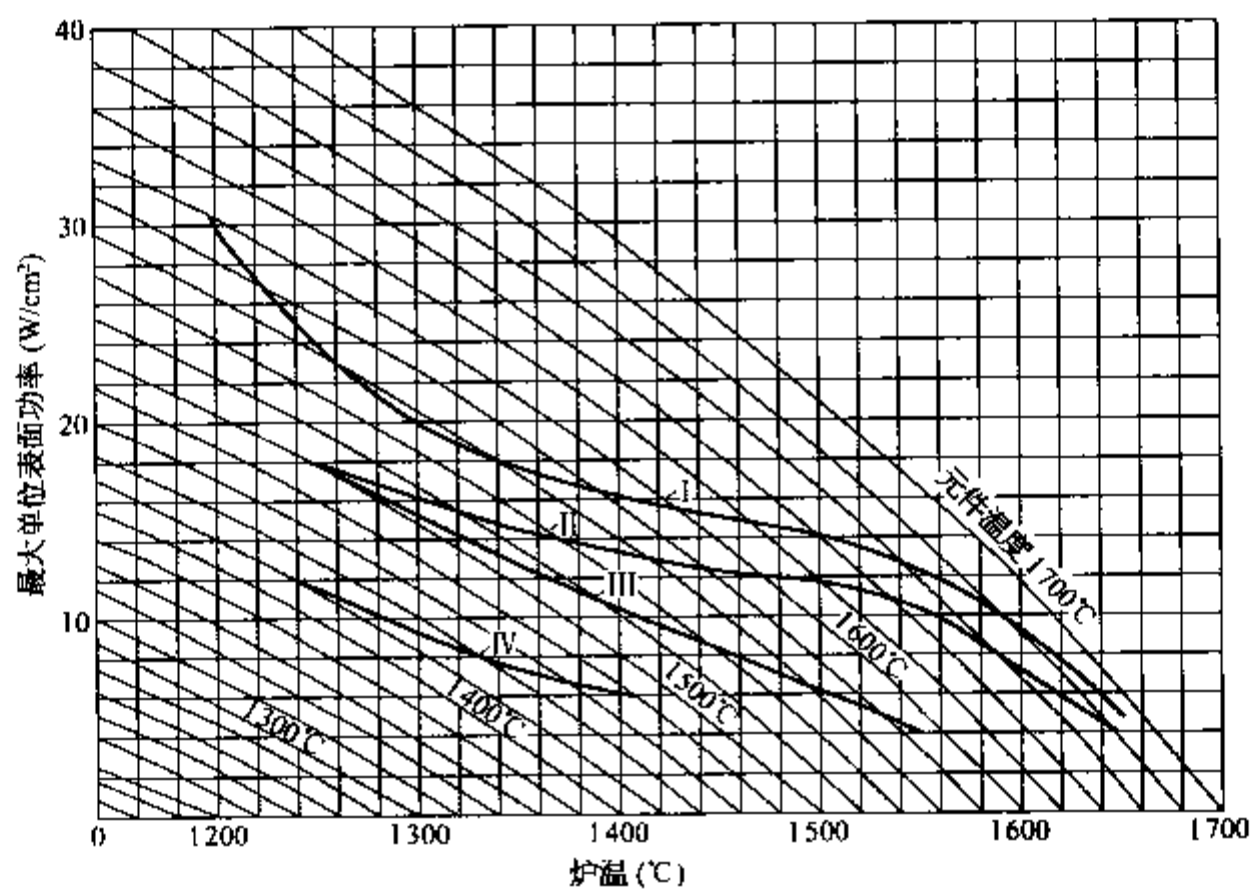


图 9-50 硅钼电热元件允许的最大单位表面功率

I—垂直安装连续加热；II—垂直安装间断连续加热；  
 III—水平安装连续加热；IV—水平安装间断连续加热

### 3) 石墨电热材料与电热元件

(1) 石墨电热材料：石墨电热材料的电阻率、热导率高，承受的单位表面功率大，热导率随温度升高而下降；耐高温，在保护气氛中可达  $3000^{\circ}\text{C}$ ；高温尺寸稳定好，强度随温度升高而增加，抗热振性、耐崩裂性强，且易于机械加工；但在空气中加热易氧化。石墨电热材料主要适于在真空中和保护气氛条件下工作。

(2) 石墨电热元件：石墨电热元件的种类有棒状电热元件、板状电热元件、管状电热元件、带状电热元件和布状电热元件，而棒状电热元件又有 U 形、W 形和螺旋形，见图 9-51。

石墨电热元件的主要性能见表 2-53，普通石墨电极的高温性能见表 9-131，石墨元件允许的单位表面功率见图 9-52，石墨棒电阻率实测值见表 9-132。

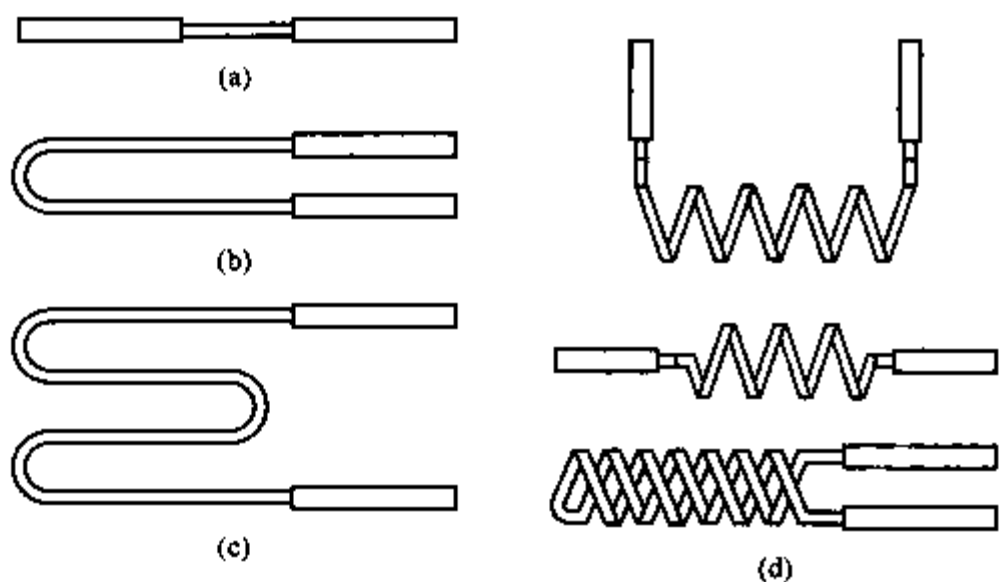


图 9-51 石墨电热元件形状

(a) 棒状；(b) U 形；(c) W 形；(d) 螺旋形

- 注：1. 发热段直径为 8 mm、12 mm、15 mm、20 mm、32 mm。  
 2. 发热段最大长度：棒 3 000 mm，U 形 1 800 mm，W 形 1 800 mm。  
 3. 螺旋形的内径可达 500 mm，螺旋高度可达 1 000 mm。

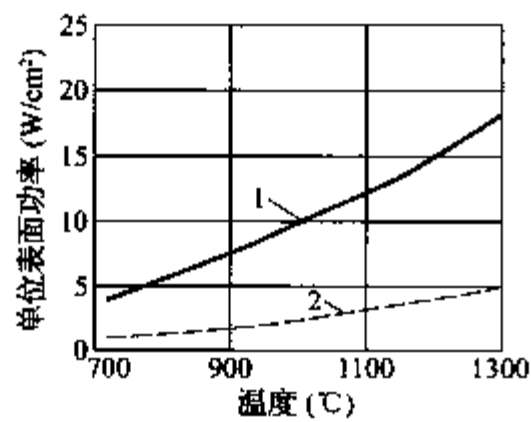


图 9-52 石墨元件允许的单位表面功率

1—石墨棒；2—石墨带

表 9-131 普通石墨电极高温性能

温度(°C)	比热容[J/(g·°C)]	热导率[W/(m·°C)]	黑 度
20	0.71		
200	1.17		
400	1.47		
600	1.67		
800	1.84		0.58(727°C)
927		34.53(900°C)	0.62
1 000	1.88	33.29	0.635
1 127		32.02(1 100°C)	0.65
1 200	1.93	31.19	
1 327		30.47(1 300°C)	0.68
1 400	2.01	29.89	0.69(1 427°C)
1 500		29.5	0.7(1 527°C)
1 600		29	0.715(1 670°C)
1 700	2.09		
1 800	2.14	28.47	0.727
1 900		28.34	0.734
2 000	2.18	28.34	0.74
2 100		28.26	0.745

(续表)

温度(℃)	比热容[J/(g·℃)]	热导率[W/(m·℃)]	黑 度
2 200			0.75
2 300			0.755
2 400			0.76
2 500			0.76

表 9-132 石墨棒电阻率实测值

温 度(℃)	700	800	900	1 000	1 100	1 200	1 300
电阻率( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ )	19.8	19.8	19.8	19.7	19.7	19.6	19.6

## 第一节 热处理生产的安全、卫生要求

### 一、热处理生产常见的危险因素

危险因素是指能对人造成伤亡或对物造成突发性损坏的因素,热处理生产中常见的化学性危险因素有易燃、易爆物质和毒性物质,物理性危险因素有高压电、炽热物体及腐蚀介质、制冷剂、坠落物体或进出物,其来源和危害程度见表 10-1。

表 10-1 热处理生产常见的危险因素(GB15735)

类别	来源	危害程度
易燃物质	淬火、回火用油 有机清洗剂 燃料、渗剂、制备可控气的原料:天然气、甲醇、乙醇、煤油、丙酮、异丙醇、丙烷、氢等	油温失控引发火灾 有机液体挥发物和气体燃料泄出遇明火燃烧引发火灾
易爆物质	熔盐、固体渗碳剂粉尘 渗剂、燃料、可控气氛、氧气、乙炔气 高压气瓶、储气罐	熔盐遇水爆炸,硝盐浴温度超过 600℃ 或与碳粉、氰化物、油脂接触爆炸 燃气、碳粉在空气中浓度达一定极限值遇明火爆炸 气瓶、储气罐遇明火或环境温度过高爆炸
毒性物质	碳氮共渗或氮碳共渗的排放物或原料: HCN、NaCN、KCN 气体渗碳的排放物 CO 盐浴中的 BaCl <sub>2</sub> 、NaNO <sub>2</sub> 及其盐渣	造成急性中毒,甚至死亡
高压电	高、中频设备,一般工业用电	电击、电伤害、甚至死亡
炽热物体及腐蚀性物质	高温炉、炽热工件、工夹吊具 热油、熔盐、激光束、酸、碱	热工件、热油、熔盐和强酸、强碱使皮肤灼伤 激光束使皮肤及视网膜损伤
制冷剂	液氮、干冰酒精、氟利昂	造成局部冻伤
坠落物体或进出物	工件吊运,工件淬裂、校直崩裂	造成砸伤或死亡

### 二、热处理生产常见的有害因素

有害因素是指影响人的身心健康,导致疾病(含职业病)或对物造成慢性损坏的因素。其与危险因素的主要区别在于损害形式不同,有害因素属缓慢性的,而危险因素为突发性的。热处理生产常见的有害因素有热辐射、电磁辐射、噪声、粉尘和有害气体等,其来源和有害程度见表 10-2。

表 10-2 热处理生产常见的有害因素(摘自 GB15735)

类别	来源	有害程度
热辐射	高温炉、炽热工件、夹具和吊具	造成疲劳、中暑、衰竭
电磁辐射	高、中频电源	造成中枢神经系统功能障碍和植物神经失调
噪声	喷砂、喷丸、加热炉的燃烧器 真空泵、压缩机和通风机 中频发电机、超声波清洗设备	长期处于高强度噪声(>90 dB)会造成听力下降
粉尘	喷砂、喷丸时的粉尘 流态粒子炉的石墨和氧化铝粉 固体渗碳、渗硼剂	长期处于高浓度粉尘作业会引起矽肺
有害气体	盐浴炉烟雾、油蒸气、燃烧的有毒废气: NO <sub>x</sub> 、CO、NH <sub>3</sub> 、HCN 等, 有机液体的蒸气 强酸、强碱的挥发物, 氟利昂	造成各种急慢性疾病, 严重时可导致死亡
液体废物	老化的淬火、回火油	严重影响环境污染

### 三、热处理生产厂房的建设要求

- (1) 厂房一般应建成独立的建筑物或建于大型厂房的一端、一侧, 但要用隔墙隔开。
- (2) 厂房结构的外墙、隔墙、地面、顶棚应采用防火耐热结构。
- (3) 地面强度应根据生产对象与批量, 能承重 1~5 t/m<sup>2</sup> 的载荷, 地面材料要求耐热、耐蚀、耐冲击, 按工艺要求可分别选用花网钢砖或铸铁砖、混凝土、耐酸水泥和水磨石地面。
- (4) 厂房要有足够的高度, 并合理开设天窗。
- (5) 厂房内和产生危害物质的区域, 如浴炉、淬火槽、清洗槽等处应有足够能力的抽风装置。
- (6) 氰盐浴、高中频设备、激光、喷丸和喷砂等设备应隔成独立的房间, 并应能满足危险工作区域的特殊要求。
- (7) 气体分配站、液氨、液化石油气储罐、危险品等应放在车间外部的专用房间内, 并与车间保持一定的距离。
- (8) 厂房内的煤气、乙炔、氧气等输送管道的架设应保持一定的安全距离, 并经常检查管道及阀门, 不得有泄漏现象。
- (9) 液体碳氮共渗、酸洗间等顶棚、墙壁、地面应光滑、防潮, 并便于清洗。
- (10) 厂房应配备气体除尘装置, 并设置污水处理设施, 使污水达标后排放。
- (11) 厂房应设避雷装置、足够数量的消火栓、灭火器具及其他消防设备设施。
- (12) 厂房内应设疏散出口通道, 地坑不得渗出地下水。

### 四、热处理作业环境的主要要求

- (1) 车间内工作地点的夏季温度不得超过表 10-3 的规定。当工作地点的温度超过 35℃, 应采取有效的降温措施。

表 10-3 车间内工作地点的夏季空气温度规定

当地夏季通风室外计算温度	工作地点夏季空气温度规定 (℃)								
	≤22	23	24	25	26	27	28	29~32	≥32
工作地点与室外温差	10	9	8	7	6	5	4	3	2

- (2) 工作场地空气中有害物质的最高容许浓度见表 10-4。



表 10-4 工作场地空气中的有害物质的最高容许浓度

(mg/m<sup>3</sup>)

有害物 质	最高容许浓度	有害物 质	最高容许浓度
CO	30 <sup>②</sup>	丙酮	400
CO <sub>2</sub>	15	苯	40
苛性碱(换算成 NaOH)	0.5	三氯乙烯	30
氮氧化物(换算成 NO <sub>2</sub> )	5	氟化物(换算成 F)	1
NH <sub>3</sub>	30	二甲基甲酰胺 <sup>①</sup>	10
氢化氰及氢氰酸盐(HCN) <sup>①</sup>	0.3	粉尘	2(含 10%以上游离 SiO <sub>2</sub> ), 1(含 80%以上游离 SiO <sub>2</sub> )
Cl <sub>2</sub>	1		
氯化氢及盐酸	15	钡及其化合物	0.5(推荐值)
甲醇	50		

注: ① 除经呼吸道毒害人体外,尚易经皮肤吸收的有害物质。

② CO 的最高容许浓度在作业时间短暂时可放宽;在作业时间 1 h 内,容许达到 50 mg/m<sup>3</sup>;0.5 h 容许达到 100 mg/m<sup>3</sup>;15~20 min 容许达到 200 mg/m<sup>3</sup>。在上述条件下反复作业时,两次作业之间须间隔 2 h 以上。

(3) 工业企业噪声卫生标准见表 10-5。A 声级最高不得超过 115 dB。

表 10-5 新建、改建企业噪声标准

每个工作日接触噪声时间(h)		8	4	2	1	1/2	1/4
改建企业允许噪声 A 声级 <sup>①</sup> (dB)		90	93	96	99	102	105
新建企业允许噪声 A 声级 <sup>①</sup> (dB)		85	88	91	94	97	100

注: ① A 声级指测声仪(声级仪)中安装滤波器(称 A 计权网络),中、低频声按比例衰减通过,而 100 Hz 以上的声音无衰减地通过,这种被 A 网络计权的声压级称为 A 声级。

(4) 按各操作工位的光照度要求可划分为一般照明、局部照明和混合照明。厂房备有应急照明灯。

(5) 车间内生产设备、物料存放点应方便人员操作,并设有宽度不小于 1.5 m 的人行通道和不小于 3 m 的车行通道。

(6) 设备至墙壁间的距离应大于 1 m,设备之间距离应不小于表 10-6 的规定。

(7) 对危及人身安全的设备及区域,应设置醒目的安全标志牌、报警设施及保护设施。

表 10-6 设备与设备之间的距离

(m)

设备类别	推荐的设备间距离	设备类别	推荐的设备间距离
推杆式和输送带式炉等大型设备	3.0	在机加工生产线上的高频设备	1.5
滚球式大型箱式炉	1.5~3.0	小件用的淬火槽	1.0(离加热炉) <sup>①</sup>
工具车间用小型多用炉	1.0~2.0	大件用的淬火槽	1.5~2.5(离加热炉) <sup>①</sup>

注: ① 不适用于连续式淬火生产线。

(8) 电磁辐射:

高、中频感应加热会对某些人造成中枢神经系统功能障碍和植物神经失调,要求对设备进行屏蔽,使作业区达到电场强度不超过 20 V/m,磁场强度不超过 5 A/m。

对于高频电磁辐射,按 GB8702 的规定,职业照射在每天 8 h 工作期间,任意连续 6 min,按全身平均的比吸收率(指生物体每单位质量所吸收的电磁辐射功率,即吸收剂量率)应小于 0.1 W/kg,公众照射在 24 h 内,任意连续 6 min,按全身平均的比吸收率应小于 0.02 W/kg。

## 第二节 热处理设备的安全、卫生要求

### 一、电阻炉的安全、卫生要求

- (1) 必须配备炉门(盖)打开时的自动切断主回路电源的联锁装置。
- (2) 带电部分要有良好的绝缘,不带电部分要接地。
- (3) 打开和提升炉门时,电热体和风扇能同时断电。
- (4) 渗碳炉要有良好的密封性。通气(或有机液体)井式炉炉压不低于 200 Pa。箱式、推杆式炉炉压不低于 20 Pa。
- (5) 可控气氛炉前室顶部必须设安全防爆阀,截面积不小于  $0.05 \text{ m}^2$ ,动作压力不大于 500 Pa。
- (6) 通水冷却的电阻炉应安装水温、水压和流量继电器,当出现不正常情况时,应能断电,并及时报警。

### 二、燃油、燃气炉的安全、卫生要求

- (1) 燃油、燃气炉管道应设总阀门,每台设备上设分阀门。
- (2) 通入炉内的气、油管道要有压力调节阀、截止阀。
- (3) 燃烧器前应有火焰逆止器,工作炉应设防爆装置。
- (4) 燃烧器的工作噪声、氮氧化物的排放量和燃料与空气混合均匀性等技术指标均应符合有关规定。
- (5) 设置的可燃气放散排气管应高于屋顶 2 m。

### 三、感应加热装置的安全、卫生要求

- (1) 高频设备必须屏蔽,其上的观察窗应敷金属网,对裸露在外的变压器也应加以屏蔽。作业部位高频辐射的电场强度不超过  $20 \text{ V/m}$ ,磁场强度不超过  $5 \text{ A/m}$ 。
- (2) 高压部分有防触电的特别保护装置,当外壳打开时,主回路电源应自动切断。设备场所设警示牌,设备外壳必须接地。
- (3) 中频电机应配备空载限制器。
- (4) 控制按钮和开关要置于明显和容易触到的位置。同一台设备供数个工作点时,可采用集中控制的工作台,但每个工作点须设急停按钮。

### 四、真空热处理设备的安全、卫生要求

- (1) 真空炉的抽气系统中应配备与电源联锁的自动阀门,在发生停电事故时关断抽气管路,防止空气和真空泵油进入炉内。
- (2) 设备应配备安全防爆装置。
- (3) 所有抽空装置必须具有排气管道,并将气体排放到室外。
- (4) 储气罐应配备安全阀。
- (5) 传递工件的各个运行机构应有可靠的联锁装置。
- (6) 控制柜应有电源急停装置。

### 五、气氛炉的安全、卫生要求

- (1) 吸热式气体发生炉或工作炉要配备温度大于  $760^\circ\text{C}$  方能通气的安全控制系统,气氛炉有一定的密封性要求。
- (2) 可燃气体和制备气氛在一定的混合比下有发生爆炸的危险(在密封容器及火种的情况下),设备应具有安全防爆装置。
- (3) 吸热型、放热型、氨制备气体发生炉的管路必须安装火焰逆止器。
- (4) 各种气体发生炉都应具备在用气量发生变化时(即使降为 0 时)仍不影响正常工作的措施(包括产气

的成分及安全)。

(5) 发生炉放散的气体及工作炉排出的废气应点燃(CO有毒,CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>属单纯性窒息气体)。

## 六、淬火、回火油槽的安全、卫生要求

(1) 等温、分级淬火和回火油槽必须配备加热、冷却、搅拌装置和溢流、回流系统,并应设置等容积的泄油罐和与之相匹配的排油泵。

(2) 淬火、回火油的工作温度至少比其闪点低 50℃以上,淬火油容量要与淬火件质量相匹配。

(3) 油槽在非工作状态时,加热器应安装在油面以下 150 mm 处。

(4) 配备必要的灭火设施及器具,废油必须集中回收处置。

## 第三节 热处理工艺作业的安全、卫生要求

### 一、整体热处理

整体热处理作业时的安全、卫生要求:

(1) 工件装炉不得超高、超长、超宽,放置须平缓。

(2) 电阻炉应有一定的绝缘电阻(三相电热元件对地绝缘电阻不小于 0.5 MΩ,控制电路对地绝缘电阻不小于 1 MΩ)。

电阻炉工件装出炉时,必须切断电源,风扇出故障时应停用。

(3) 燃气、油炉应经常检查管路的漏气、油及烧嘴的燃烧情况。调整好气、油与空气的燃烧比。

检查风机属正常状态时才能对烧嘴点火,燃气炉烧嘴点火时,先开炉门及空气,排除残余可燃气后,点火开可燃气;停止烧嘴燃烧时先关可燃气后再关空气。

(4) 保护气氛(控制气氛)炉一般情况下,炉温小于 760℃时,不得向炉内通入可燃气体。

凡在下列情况,须向炉内通入惰性气体或氧含量小于 1%的不可燃气体作为安全冲淡气(置换气体):

① 工艺要求在炉温小于 760℃向炉内送入可燃气体;② 炉子启动时或停炉前;③ 气源或动力源失效时;④ 炉子进行任何修理之前,中断气体供应时。

(5) 盐浴炉启动时,应防止已熔的部分盐液发生飞溅现象。添加的新盐、工件、夹具、脱氧剂等必须预先烘干,几种盐配比的新盐须混匀,并沿坩埚边缘缓慢加入。严禁封闭的空心工件进入盐浴中加热,管件加热时,管口不应正对着人。

硝盐炉温度不超过 550~600℃,硝盐炉最好采用电加热,控温仪表有超温保护,不允许处理镁合金,并严禁木炭粉、油污、氰化物进入硝盐浴,以及硝盐进入中、高温盐浴槽。

### 二、表面热处理

表面热处理主要包括中、高频感应淬火、火焰淬火、激光热处理等。其安全、卫生要求:

#### 1. 中、高频感应淬火作业

(1) 高频设备周围应保持场地干燥,并铺设耐 25 kV 高压的绝缘橡胶板和设置防护遮拦,操作人员应穿绝缘鞋。

(2) 严格按设备的操作规程进行操作,当设备运转正常后方可进行淬火操作。

(3) 感应器不得在空载时送电。

(4) 工件在淬火过程中如出现异常情况,应立即按急停按钮,切断高、中频电源,检修时应先放电。

(5) 高、中频设备冷却用水的温度不得低于空气的露点温度。

#### 2. 火焰淬火作业

(1) 氧、乙炔、丙烷气瓶应与火源保持 10 m 以上的距离,并避免曝晒、热辐射及电击;气瓶应有防冻措施,当瓶口结冻时可用热水解冻,严禁用火烤,不得用有油污的手套开启氧气瓶,应装有专用的气体减压阀,乙炔的

最高工作压力禁止超过 0.147 MPa, 瓶中的气体不得用尽, 瓶内残余压力不得小于 98 kPa。

(2) 火焰淬火用来输送氧气、乙炔气、丙烷气的软管应采用不同颜色的胶管, 乙炔气瓶必须直立放置。

(3) 与乙炔接触的仪表、管子等零件, 禁止使用纯铜或铜的质量分数超过 70% 的铜合金制造, 乙炔管路应设防回火截止阀, 并定期清理。

(4) 点燃喷火嘴时, 应先开乙炔(丙烷)气, 点着后再开氧气。

### 3. 激光热处理作业

工件表面必须预先施加吸光涂层, 但禁止使用燃烧时产生油烟及反喷物的涂料。

## 三、化学热处理

化学热处理方法众多, 有渗碳、渗氮、渗硼、渗金属等, 可以采用气体法、固体法、液体法甚至真空法、离子法等。作业时主要的安全、卫生要求:

(1) 正确使用各种渗剂。使用气体渗剂、液体渗剂(包括熔盐)和固体渗碳剂时, 必须严格按该产品的安全使用要求进行操作(各类渗剂多数属于易燃、易爆、有毒性的危险品, 各类渗剂的使用、运输、储存都有着各自特殊的安全要求)。

(2) 废气必须点燃。气体渗碳、碳氮共渗或氮碳共渗时, 排气口排出的废气中含有毒物质, 如 CO、HCN 等, 必须通过燃烧分解后排放, 否则将造成车间内空气中的有毒物质超标, 危害操作者的健康。同样, 工件出炉时应先将废气烧净。

(3) 固体渗碳、固体渗硼及粉末渗金属的场地应设抽风排气系统, 空气中粉尘含量应达到有关的规定标准。

(4) 可控气氛炉的通气方法参见整体热处理作业时的安全卫生要求。

## 四、真空热处理

一般真空热处理整个加热、冷却过程是在真空容器内运行, 因而工作环境好、无污染、无公害。作业时的安全、卫生要求:

(1) 通电前应测量电热元件对地(炉壳)的绝缘电阻, 应不低于 10 MΩ 时方可送电(低电压大电流加热的内热式真空炉  $< 2 \text{ k}\Omega$ , 其他高电压外热式  $< 10 \text{ M}\Omega$ )。

(2) 对多室真空炉, 为避免热闸阀反向受力, 加热室压力应低于预备室压力。

(3) 在向炉内通入氢或氮氢混合气体时, 炉内必须达到规定的泄漏率, 不得有漏气现象。

(4) 使用高真空油扩散泵时, 扩散泵真空度达到 10 Pa 时方可通电加热扩散泵油, 而停泵时扩散泵油必须完全冷却后方可停止抽空。

(5) 炉温高于 100℃ 时, 不得向炉内充入空气或打开炉门。

(6) 停炉前炉内温度必须低于一定温度(150℃)时方可停电断水。

(7) 工件入炉前必须洁净、干燥、无油污和挥发物, 以免污染真空室而影响真空热处理的效果。

(8) 真空淬火油应进行充分的除气处理, 除气时真空度不宜过高。

## 第四节 热处理安全、卫生防护 技术措施及管理措施

所有热处理作业场地都必须制定安全、卫生防护技术措施, 要求达到:

(1) 能预防生产过程中产生的危险和有害因素。

(2) 能处置危险和有毒物, 并降低到国家规定的限值内。

(3) 能从作业区排除危险和有害因素。

(4) 能预防生产装置失灵或操作失误时所产生的危险和有毒因素。

(5) 发生意外事故时, 能为遇险人员提供自救条件。

## 一、“四防”

“四防”的具体内容见表 10-7。

表 10-7 热处理安全、卫生“四防”

项 目	具 体 要 求
防护用品	定期向热处理操作人员发放劳动保护用品,并应按规定穿戴、使用。在液体渗碳、碳氮共渗(涉及氰化物)等工艺对人身危害程度较大的作业环境中使用过的防护用品,应制定严格的管理制度,统一洗涤、消毒、保管和销毁
防火防爆	在存放易燃、易爆物质的库房和有产生易燃、易爆因素的设备及工艺作业场地,应正确选择和配备足量的消防设备和器材 对控制室、配电间、贵重设备和仪器等,应备有自动报警装置,必要时应设置自动灭火系统
防尘防毒	对产生粉尘和毒性物质的工艺作业场地,要制定切实可行的监督制度 对毒性物质要制定严格的使用、保管和回收制度,并备有必要的防毒面具 对在粉尘、有毒环境中的作业人员,应严格执行休息、就餐、洗漱及污染衣服洗涤管理制度
防止作业环境气象异常	应根据热处理生产特点,采取相应措施,以保证车间和作业环境的气象条件符合防寒、防暑、防湿的要求

## 二、消防

### 1. 燃烧与灭火的基本方法

1) 燃烧 燃烧是一种同时伴有发光、发热的激烈氧化反应,燃烧必须同时具备三要素:

(1) 可燃物有一定的数量,可燃物如木材、煤、汽油、液化石油气、甲烷等。

(2) 助燃物达一定的比例,助燃物通常是氧化剂,如空气、氧气等。

(3) 着火源有一定的温度和足够的热量。撞击、明火、高温表面、发热自燃、电火花、光和射线等均为着火源。

三个要素存在相互作用关系,只要缺少其中任何一个要素,燃烧便不能发生。当外来火源或灼热物质与可燃物接近时,产生持续燃烧的现象叫着火。使可燃物质持续燃烧 5 s 以上时的最低温度称为该物质的燃点(或称着火点、火焰点)。一般燃点比闪点高出 5~20℃,但闪点小于 100℃ 的物质两者往往相同,如易燃液体的燃点与闪点(闪点为遇火能发生闪燃的最低温度)很接近,仅差 1~5℃;对于闪点大于 100℃ 的可燃液体,两者可差 30℃。部分可燃液体的闪点见表 10-8。

表 10-8 部分可燃液体的闪点 (°C)

物质	乙醇 <sup>①</sup>	丙酮	汽油	煤油	轻柴油	重柴油	重油	L-AN15 (原 10 机械油)	L-AN46 (原 32 机械油)	普通 淬火油
闪点	11	-10	-43	28~45	45~120	>120	80~130	125	170	170

注:① 乙醇水溶液中乙醇含量为 80%、40%、20%、5% 时,其闪点分别为 19℃、26.75℃、36.75℃、62℃。

2) 灭火的基本方法 有隔离法、窒息法、冷却法和抑制法,见表 10-9。

表 10-9 灭火的基本方法

灭火方法	灭 火 原 理	举 例
隔离法	将未燃物与可燃物隔离开,使燃烧因为缺乏氧气而停止	关闭可燃气,将火源附近的可燃物、易燃、易爆物等搬走
窒息法	稀释燃烧区的氧气,使燃烧缺乏氧气而停止	用 CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> 、水蒸气等灌注容器设备,或用石棉毡、黄沙等不燃物或难燃物覆盖在燃烧物上

(续表)

灭火方法	灭 火 原 理	举 例
冷却法	通过降低燃烧物的温度,使其低于燃点而结束燃烧	水喷洒冷却、喷 CO <sub>2</sub> 泡沫等
抑制法	用有抑制作用的灭火剂喷射到燃烧区,并参与控制燃烧的过程,从而终止燃烧	干粉灭火

## 2. 水及消防灭火剂

1) 水 水是常用的灭火介质,其灭火作用有冷却降温作用,隔绝空气作用,对水溶性可燃、易燃液体的稀释作用,乳化可燃液体作用以及冲击作用。水灭火的使用形态、产生方式及适用场合见表10-10。

表 10-10 水灭火的使用形态、产生方式及适用场合

使用形态	产生方式	适用场合
密集水流	水泵加压,喷出直流水柱,具有较大冲击力,射程较远	扑救一般固体可燃物、闪点高于 120℃ 的重油火灾 冷却火源附近的物体以及利用冲击力,切断或赶走火焰
开花水流	水泵加压,喷出开花滴状水流(水滴直径大于 100 μm)	
喷雾水流	水泵加压,喷出雾状水流(水滴直径小于 100 μm)	扑救粉尘、纤维状物质等固体可燃物火灾及闪点高于 60℃ 的可燃液体火灾 用于扑救带电设备(因喷出的微小水滴互不接触) 用来对可燃气体泄漏气进行稀释、防爆
水蒸气	利用产生的水蒸气	稀释可燃蒸气浓度和降低燃烧区的含氧量,当水蒸气在燃烧区的体积浓度大于 35% 时,即可使火熄灭,一定条件下可作淬火油槽的灭火 扑救高温设备、容器、煤气管道的火灾

使用注意点:

- (1) 在钠、镁等碱金属火灾和电石等火灾中,绝对禁用水扑救。
- (2) 易被水破坏而失去实用价值的物质与设备,如图书、文物资料、精密仪器和设备,不可用水扑救。
- (3) 汽油、煤油等不溶于水的易燃液体,不能用直流水扑救,但具备一定条件和技术情况下,可对原油、重油用喷雾水扑救,汽油用喷雾水和水蒸气扑救。
- (4) 熔融盐类火灾不能用水扑救,因水汽化会促使其发生爆炸或喷溅、沸溢产生伤亡和损失。
- (5) 对储存大量浓硫酸、浓硝酸的场合,发生火灾时应慎用水灭火,以免引起酸发热飞溅伤人。
- (6) 高压电器火灾不能用水,因水有导电性。如保持一定距离,并做好防护准备,可采用喷雾水扑救。
- (7) 可燃粉尘(如面粉、铝粉、煤粉)积聚之处的火灾,不能用直流水扑救,防止粉尘冲起而发生爆炸。

## 2) 常用的消防灭火剂(表 10-11)

表 10-11 常用的消防灭火剂

名称	产生与作用	种类	适用及注意点
泡沫灭火剂	通过化学反应或机械方法产生泡沫。泡沫体积较小,相对密度远远小于一般可燃、易燃液体,形成的泡沫覆盖层,使燃烧物与空气隔开,达到窒息灭火作用	有化学泡沫灭火剂,主要由硫酸铝和碳酸氢钠药剂并添加防腐剂、泡沫稳定剂等组成,经化学反应产生 CO <sub>2</sub> 泡沫灭火。另外有空气泡沫灭火剂,可分为低、中、高倍数泡沫三类	扑救一般可燃、易燃液体及一般固体的火灾 注意点:泡沫液一般略有腐蚀性。另外对电线着火必须先断电才能使用,否则喷出的药液导电会致人员触电伤亡

(续表)

名称	产生与作用	种类	适用及注意点
干粉灭火剂 (化学粉末灭火剂)	借助气体压力(液态 CO <sub>2</sub> 或氮气)将干粉喷出,抑制、中断有焰燃烧的链式反应,同时干粉在高温下,吸热生成 CO <sub>2</sub> 、水蒸气,对燃烧区氧浓度有稀释作用	分普通干粉及多用途干粉两类。前者主要用于液体、气体的火灾,后者用于固、液、气体的火灾	扑救可燃气体、液体、固体的火灾。不腐蚀、不导电,但灭火后有残渣,不宜用于精密仪器设备、旋转电机的火灾。不能扑灭阴燃火灾,容易发生复燃。喷射时要防止药剂的冲击力使可燃液体溅出容器造成火势蔓延扩大
气体灭火剂	产生灭火气体,起窒息灭火及冷却作用	CO <sub>2</sub> 气体灭火剂; 卤代烷及代卤代烷新型气体灭火剂,有十余种,其中一种 N <sub>2</sub> 52%、Ar40%、CO <sub>2</sub> 8%(体积分数)的烟烙尽灭火剂	扑救可燃固体、液体火灾和电气火灾,也用于扑灭精密仪器、贵重资料、设备等火灾 灭火后散逸快,不留痕迹,不污损燃烧物,也不导电 须注意该灭火剂有些有低毒或影响人的安全,使用时要在无人场所或上风方向,并要防止窒息或冻伤 卤代烷气体对大气臭氧层有破坏作用,已淘汰
植物型阻燃灭火剂	由多种阻燃物质组成,起灭火作用	是一种新型灭火剂,由多种植物、草木灰和改性水经加工而成	对石油火灾,可燃固、液、气体的火灾进行扑救。适用范围广,尚待推广使用

## 3) 热处理生产中常见的失火及扑救(表 10-12)

表 10-12 热处理生产中常见的失火及扑救

类别	产生原因	扑救及注意点
电气设备失火	线路容量设计不当,长期负载过大或违反规程,超负荷运行,导致线路发热失火 短路、断路、接头松动引起失火 电气开关附近有可燃气体或液体泄漏,遇开关通断时产生电弧火花引起失火 高静电场的容器或设备接地不良,发生放电现象引发火灾	一旦发生电气设备失火,首先要切断电源,移开失火设备附近的可燃物,并迅速用 CO <sub>2</sub> 或 CCl <sub>4</sub> 灭火器灭火 注意切勿在通电状态下使用泡沫灭火器或水来灭火,以防触电
油槽或油炉失火	油温过高超过油的闪点,会使油燃烧引发火灾 炽热工件淬油时,未全部入油使油面处的温度急剧上升引发火灾 槽周大量油迹遇火种起火,加热的油回火炉迅速添加新油时,由于新油中的水迅速汽化引起外溢起火	防止油温过高、槽内积水 设置油槽盖,大型油槽槽口周围设置灭火装置及事故紧急排油系统 采用 CO <sub>2</sub> 或泡沫灭火器灭火,切忌用常态的水扑救
可燃物失火	天然气、煤气、液化石油气、甲醇、乙醇、丙酮、煤油等泄漏遇火种起火,或可燃性液体温度过高,超过闪点引起燃烧起火	对管路、阀定期检查,加强通风,禁止工作场地吸烟,库存区设防火墙,防雷击 失火时,应切断气源或液源,并用灭火器灭火
硝盐槽失火	温度过高或炭粉、油、氰化物进入硝盐槽引发火灾(甚至爆炸)	切断加热源,保持硝盐静止。采用干沙灭火,不能用泡沫灭火器或湿砂灭火,因水与燃烧的硝盐接触会发生爆炸,造成硝盐大量飞溅

### 三、爆炸的产生及防护

#### 1. 爆炸的产生

爆炸是指物质自一种状态迅速地转变成另一种状态,并在瞬间放出巨大能量,同时产生巨大声响的现象,即能量快速释放的过程。爆炸常伴有发热、发光、压力上升、真空或电离等现象。生产中遇到的爆炸事故有:

(1) 物理性爆炸。如容器内液体过热、汽化引起的爆炸、锅炉爆炸、液化气体超压引起的爆炸等,爆炸前后物质的性质和化学成分不改变。

(2) 化学性爆炸。如可燃气体或蒸气与一定比例的空气混合,点燃后发生异常激烈的燃烧、爆炸,爆炸前后物质的性质和成分均发生根本的变化。

(3) 粉尘爆炸。有些粉尘在空气中达到一定浓度时,在外界引爆能源作用下,引起爆炸。

气体爆炸必须具备的三个基本条件:合适浓度的燃料气体、合适浓度的氧气以及有足够能量的点火源。表 5-25 为可燃气体和空气混合的危险浓度。

影响爆炸范围(爆炸极限)的因素有:原始温度、原始压力、容器的尺寸与材质、惰性介质以及点火源等。一般原始温度越高、原始压力越大、点火源能量越大,爆炸极限的范围也越大,但随爆炸气中惰性气体含量的增加,爆炸极限范围缩小,因此不可把爆炸极限值看作为一个物理常数。一般表中列出的是在常温和标准压力下使用能量为 10 J 的火花隙作为点火源测得的数值。

常见工业粉尘的爆炸下限为 20~60 g/m<sup>3</sup>,爆炸上限为 2~6 kg/m<sup>3</sup>。

热处理作业中常见的爆炸有可燃气体的爆炸、固体渗碳剂粉尘爆炸、高压气瓶储气罐的爆炸以及熔盐的爆炸飞溅。

#### 2. 爆炸的预防及防护

可燃气体及粉尘爆炸的预防及防护见表 10-13。

表 10-13 可燃气体及粉尘爆炸的预防及防护

爆 炸 预 防	爆 炸 防 护
1) 对气体进行惰化,即用惰性气体取代空气中氧,使其降至极限氧浓度以下,使爆炸不能发生,常见的惰性气体有氮、CO <sub>2</sub> 或卤代烃。如可燃气体(可控气氛炉)通气前用氮气赶气、停炉时用氮气作置换气 2) 降低可燃气体或粉尘的浓度,如选用爆炸性低的气源,加强对厂房内泄漏易燃易爆气体的积聚处或粉尘危险区的通风排气 3) 减少和防止产生点火源,如在有火灾爆炸危险环境中生产的电气设备,应采用防爆型	1) 泄爆及增设防爆泄压装置,如燃气炉点火前先打开炉门,使用一次性的爆破膜或重复使用的防爆盖、防爆瓣阀和放空管等泄压装置泄爆 2) 增设爆炸遏制系统。通过传感器(采用热电、光学或压力传感器)检测初始爆炸信号后,在极短时间内开通压力开关或灭火剂,使灭火剂均匀地喷射到保护容器内,来遏制爆炸 3) 在厂房结构、环境通道等处,增设防止爆炸传播的设施及安全措施

对于高压气瓶、储气罐,使用中要注意通风,避免温度过高,平时应放在远离车间的单独房间内。高压气瓶、储气罐有一定的充装系数,不能装得过满。

对于熔盐,应防止带有水分的潮湿工件或工夹具进入盐浴槽,防止未经烘干的新盐、脱氧剂进入盐浴槽,严禁木炭粉、油污、氰化物进入硝浴槽以及硝酸盐随工件或工夹具进入中、高温盐浴槽。另外硝浴槽的温度不允许过高(不高于 550~600℃)。

### 四、热处理生产安全监督

(1) 热处理生产场地应设置必要的检测仪器,监督危险和有害物质的水平。

(2) 热处理场地使用的安全防护装置、闭锁装置以及自动控制系统等,应根据相应的标准或技术文件定期检查其完好的程度,不得任意废弃不用或拆除。

(3) 使用有危险和有毒的气体时,应做好对排气通风装置的检查工作,并安装信号指示系统。

(4) 氰化物盐浴、硝酸盐和亚硝酸盐的混合物盐浴应设有熔盐过热预警(保护)装置。



## 五、热处理生产的安全、卫生管理措施(表 10-14)

表 10-14 热处理生产的安全、卫生管理措施

项 目	具 体 要 求
基本要求	发现、分析和清除生产过程中的各种危险因素和有害因素 制定相应的安全、卫生规章制度 对各类人员进行安全、卫生知识的培训、教育 防止发生事故和职业病,避免各种损失,从而使热处理车间实施以保证生产过程安全、卫生为目标的现代化管理
对人员的基本要求	心理、生理条件应能满足工作性质要求 应定期进行体检,其健康状况必须符合工作性质的要求
对人员的技能要求	必须掌握本专业或本岗位的生产技能,并经安全、卫生知识培训和考核,合格后方可上岗 熟悉热处理生产过程中可能存在和产生的危险和有害因素,掌握导致事故的起因,并能根据其危害性质和途径采取防范措施 了解本岗位的工作内容,以及与其相关作业的关系,掌握完成工作的方法和措施 掌握消防知识和消防器材的使用及维护方法 掌握个体防护用品的使用和维护方法 掌握应急处理和紧急救护的方法
安全卫生管理机构	按国家有关规定,建立和健全安全、卫生管理组织,并按规定的职能和职责,检查、监督和贯彻国家、部门下达的指令和规定,制定必要的规章制度,实行全面、系统的标准化管理

## 第五节 热处理的环境保护技术要求及环保治理

随着热处理行业的快速发展,相应带来的环境保护问题日益突出。要求全行业控制好污染、保护环境,达到国家对大气、水等环境质量标准的目标。

## 一、热处理环境污染的分类和来源

热处理环境污染分为化学性污染(来自原料、中间反应物及废弃物中的各种有害物质)和物理性污染(噪声和电磁辐射)。其分类和来源见表 10-15。

表 10-15 热处理环境污染的分类和来源(JB8434)

类别	有 害 物 质	来 源
废气	1) 一氧化碳 2) 二氧化硫 3) 氮氧化物 4) 氰化氢及碱金属氰化物 5) 氨 6) 氟及氟化物 7) 烷烃、苯、二甲苯、甲醇、乙醇、异丙醇、丙酮、醋酸乙酯、三乙醇胺、苯胺、三氯乙烯等有机挥发性气体 8) 油烟气 9) 盐酸、硝酸、硫酸蒸气 10) 苛性碱及亚硝酸盐蒸气 11) 烟尘及粉尘	1) 燃料或气氛燃烧,气体渗碳及碳氮共渗等 2) 燃料或气氛燃烧,渗硫及硫氮共渗 3) 燃料或气氛燃烧,硝盐浴,碱性发黑 4) 液体渗碳、碳氮共渗及氮碳共渗等 5) 渗氮、碳氮共渗、硫氮碳共渗等 6) 高、中温盐浴、气体渗硅、渗硼及渗金属、盐酸清洗、热镀锌及热浸铝 7) 气体渗碳及碳氮共渗剂,有机清洗剂,防渗涂料等 8) 淬火油槽,回火油炉 9) 酸洗 10) 氧化槽、硝盐浴、碱性脱脂槽 11) 燃烧炉、各种固体粉末法化学处理,热浸锌及热浸铝、喷砂,粉末法化学处理

(续表)

类别	有害物 质	来 源
废水	1) 氟化物 2) 硫及其化合物 3) 氟的无机化合物 4) 锌及其化合物 5) 铅及其化合物 6) 钒、锰及其化合物 7) 钼及其化合物 8) 有机聚合物 9) 残酸、残碱 10) 石油类	1) 液体渗碳、碳氮共渗及硫碳氮共渗 2) 渗硫及硫氮等多元共渗 3) 固体渗硼及渗金属 4) 热镀锌及渗锌 5) 热镀锌液、防渗碳涂料 6) 渗钒、渗锰 7) 残盐清洗、淬火废液 8) 有机淬火介质 9) 酸洗、脱脂 10) 淬火油、脱脂清洗
固体废物	1) 氟盐渣 2) 钒盐渣 3) 硝酸盐渣 4) 锌灰及锌渣 5) 酸泥 6) 含氟废渣 7) 混合稀土废渣	1) 液体渗碳、碳氮共渗及硫碳氮共渗等盐浴 2) 高、中温盐浴 3) 硝酸盐槽、氧化槽 4) 热浸锌 5) 酸洗槽 6) 固体渗硼剂、粉末渗金属剂 7) 稀土多元共渗剂及稀土催渗剂
噪声		燃烧器、真空泵、压缩机、通风机、喷砂和喷丸
电磁辐射		高频感应设备

## 二、废气治理与排放

热处理车间空气中有害物质见表 10-16, 工作场地空气中的有害物质最高容许浓度见表 10-4, 废气中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和  $\text{CO}$  的集中排放应符合表 10-17 的规定, 废气中其他有毒有害物质的最高容许排放浓度见表 10-18。

表 10-16 热处理车间空气中的有害物质(JB/T 5073)

来 源	有 害 物 质
高、中温盐浴	氟、氟化氢及盐酸、钒及其化合物、氟化物
渗碳、渗氮、碳氮共渗、氮碳共渗等化学热处理	一氧化碳、氨、氟化氢及氢氟酸盐、甲醇、丙酮、苯、氮氧化物、甲酸胺、甲烷
等温、分级淬火和回火等温盐浴	氮氧化物
清洗、发蓝等	苛性碱、二氧化硫、三氯乙烯、盐酸、丙酮、苯
喷砂和喷丸、浮动粒子炉、固体渗碳等	粉尘
淬、回火用油	油烟中的碳氢化合物及其他有害气体

要保证车间的空气质量标准, 关键在于对有害物质的排放进行控制或治理, 要在工艺、设施上尽量降低有害物质的排放量。如在可控气氛炉上尽量采用无害的原料气( $\text{N}_2$ ), 在燃气炉上尽量采用低  $\text{NO}_x$ 、超低  $\text{NO}_x$  烧嘴及蓄热式烧嘴(高温空气燃烧技术), 达到低的  $\text{NO}_x$  排放。

表 10-17 废气中三种有害物质的最高允许排放量(JB 8434) (kg/h)

有害物 质	排 气 筒 高 度(m)				
	10	15	20	25	30
二氧化硫	8	10	14	20	25
氮氧化物(以 $\text{NO}_2$ 计)	4	5	7	10	13
一氧化碳	58	75	95	120	160

表 10-18 废气中其他有害物质的最高允许排放浓度(JB 8434)

(mg/m<sup>3</sup>)

有害物质	标准值 <sup>①</sup>	有害物质	标准值 <sup>①</sup>
氰化物	20	氟化物	25
氨	150	苯类	150
硫化氢	80	二甲基甲酰胺	150
氯	150	烟尘及粉尘	150
氯化氢	80		

注：① 指标准状态下的测量值。

依据废气不同的物理、化学性质采用不同技术方法进行治理,常见的技术方法有吸收法、吸附法、催化转化法、燃烧法以及冷凝法等。对于渗碳、碳氮共渗、氮碳共渗工艺排出的废气 CO、HCN,只需点燃(燃烧法)即可向大气排放;对于气体渗氮及氮碳共渗工艺的氨气,无法点燃时,应通入水中排放(吸收法)。而 NO<sub>x</sub> 废气可用 NaOH 碱液或稀硝酸吸收,也可用活性炭与沸石分子筛吸附。其他废气均可参照上述的技术来治理。有条件的单位,可对某些有害物质进行净化、回收、利用,变废为宝。

为防止有害物质在车间内扩散,车间应采用局部排风或全面通风。有害物质的发生源应布置在工作点机械通风设备的下风侧。对剧毒物质的发生源应采取有效措施,合理安装通风装置,并设有事故应急排风装置,以排除车间内可能突发产生的过量有害物质,做好应急预案设置的排放设备,其排气高度不低于 10 m。取样点设在排放浓度最大的排放口。

### 三、废水治理与排放

热处理废水中的有害物质,其最高容许排放标准应符合表 10-19 的规定。

表 10-19 废水中有害物质的最高容许排放浓度(JB 8434)

(mg/L)

有害物质	最高容许排放浓度	有害物质	最高容许排放浓度
pH	6~9	铅	1.0
悬浮物	200	锰	5.0
COD <sub>Cr</sub> <sup>①</sup>	150	钒	1.0
氰化物(以 CN <sup>-</sup> 计)	0.5	钡	5.0
硫化物(以 S 计)	1.0	氨氮	25
氟化物(以 F 计)	15	石油类	10
锌	3.0		

注：① 为化学需氧量,表示用强氧化剂把有机物氧化为 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 所消耗的氧量。采用重铬酸钾氧化剂时记作 COD<sub>Cr</sub>。

一旦废水中有害物浓度超标时,必须进行无害化处理,不允许用稀释的方法来达到规定的浓度标准。废水处理的方法有:

- (1) 物理法——分离法,如沉淀、上浮、离心、筛滤、过滤等。
- (2) 化学法——混凝、中和、氧化、还原。
- (3) 物理化学法——萃取、汽提、吹脱、吸附、离子交换、电渗析和反渗透等。
- (4) 生物法——微生物代谢作用。

按处理的深度不同可分为三级处理,见表 10-20。

热处理含油废水可采用隔油池处理,即采用物理法、化学法(过滤、混凝),使油与水分离,经分离掉油的水可循环使用或排放,废油集中处理。

废水监测的取样要具有足够的代表性。

表 10-20 废水处理方法分级表

分 级	常用操作单元	作 用
一级处理	隔栅、筛网、气浮、沉淀	除去漂浮物、油、调节 pH, 为初步处理
二级处理	活性污泥法、生物膜法、厌氧生化法混凝、中和、氧化还原	除去大量有机污染物, 为主要处理
三级处理	氧化还原、电渗析、反渗透、吸附、离子交换	除去前两级未除尽的有机、无机物和病原体, 为深度处理

#### 四、固体废物及其无害化处理

##### 1. 固体废物

应对热处理固体废物的浸出毒性、急性毒性、腐蚀性和放射性进行鉴别, 凡具有一种或一种以上上述特性的固体废物, 定为有害固体废物; 凡不具备上述特性的固体废物, 定为一般固体废物。

热处理固体废物浸出毒性鉴别标准见表 10-21。

热处理固体废物急性毒性鉴别标准, 以  $LD_{50}$  (半致死) 试验评定, 能引起温血试验动物(鼠)在 48 h 内死亡半数以上者定为有害固体废物。

腐蚀性鉴别以  $pH \geq 12.5$  或  $pH \leq 2.0$  的固体废物定为有害物质。

表 10-21 热处理固体废物浸出毒性鉴别标准(JB8434)

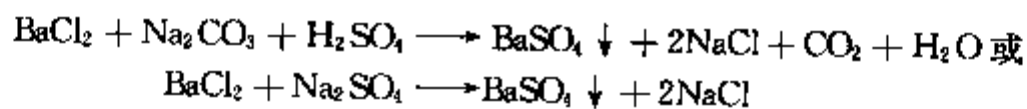
(mg/L)

项 目	浸出液的最高容许浓度	项 目	浸出液的最高容许浓度
钡及其化合物(以 $Ba^{2+}$ 计)	100	铜及其化合物(Cu 计)	50
氰化物(以 $CN^-$ 计)	1.5	锌及其化合物(以 Zn 计)	50
亚硝酸盐(以 N 计)	100	钒及其化合物(以 V 计)	50
铅及其化合物(以 Pb 计)	3.0	氟化物(以 F 计)	50

有害固体废物须经无害化处理, 如暂时没有条件进行无害化处理的有害固体废物, 应积存后统一送往当地环保部门指定的单位进行处理。

##### 2. 热处理盐浴有害固体废物无害化处理(JB/T6047)

1) 钡盐渣处理 采用沉淀  $Ba^{2+}$  法, 加入沉淀剂  $Na_2CO_3 + H_2SO_4$  或  $Na_2SO_4$ , 将可溶性有毒钡盐转变成难溶于水的无毒硫酸钡沉淀, 其化学反应式如下:



工艺流程见图 10-1。

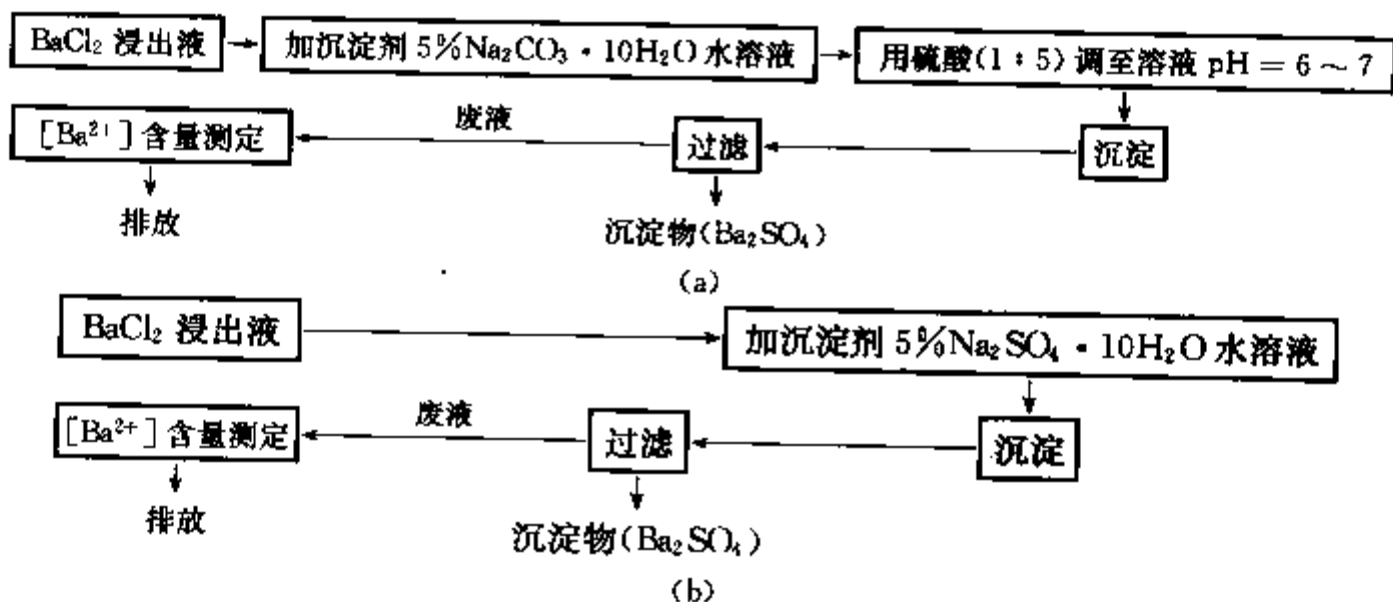
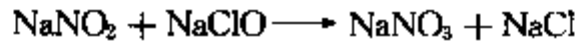


图 10-1 钡盐渣处理的工艺流程图

(a) 沉淀剂: 硫酸钠+硫酸; (b) 沉淀剂: 硫酸钠

2) 亚硝酸盐渣处理 采用氧化法,加入氧化剂 NaClO,将易溶于水的有毒亚硝酸盐氧化成无毒的硝酸盐溶液,其化学反应式如下:



工艺流程见图 10-2。

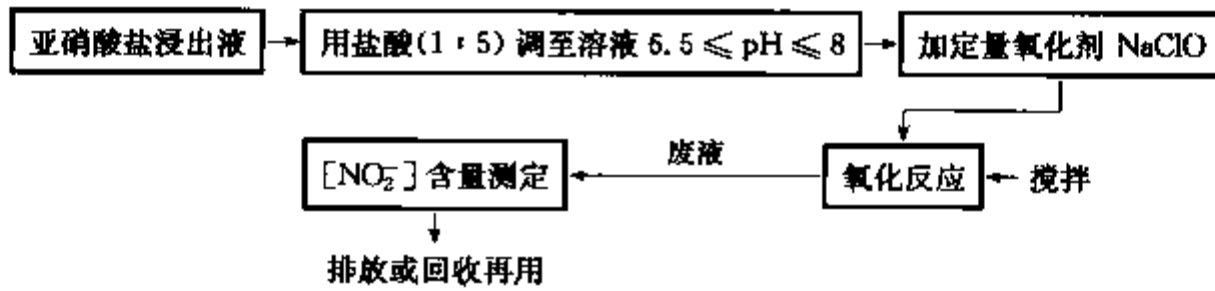
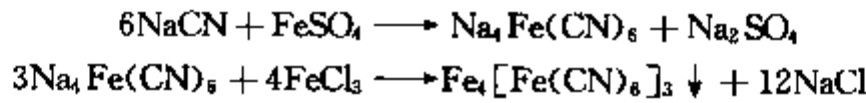


图 10-2 亚硝酸盐渣处理的工艺流程图

3) 氰盐渣处理 采用 Fe<sup>2+</sup> 络合和 Fe<sup>3+</sup> 直接反应法,加入铁盐处理,先使氰根氧化成亚铁氰化盐,再进一步氧化,最后转变成无毒的氰化盐沉淀。其化学反应式如下:



工艺流程见图 10-3。

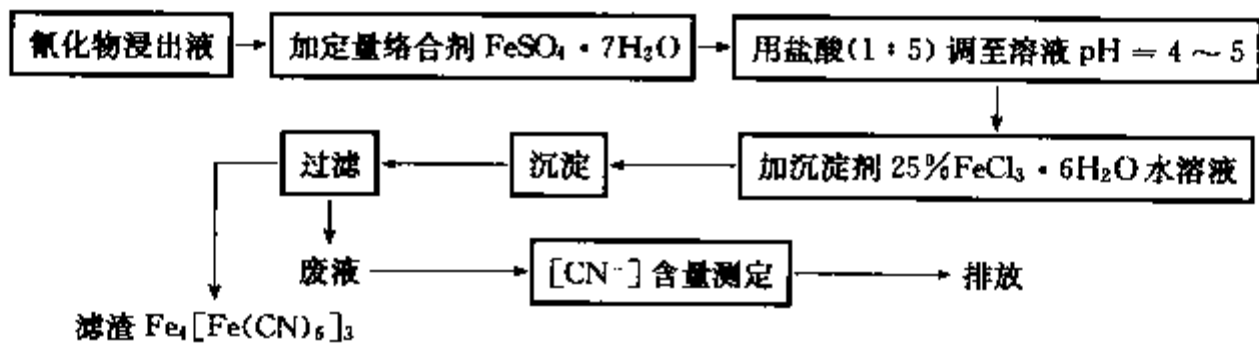


图 10-3 氰盐渣处理的工艺流程图

4) 几种盐浴废渣的处理条件(表 10-22)

表 10-22 三种盐浴废渣的处理条件(JB/T6047)

项 目	废 渣 种 类		
	钡 盐 渣	硝 盐 渣	氰 盐 渣
颗粒度(目)	≥20		
溶剂	水		
	pH≈7		pH≥8(用 NaOH 调节)
固液比(渣重:水重)	1:10		
溶渣方式	浸出 20 h 以上,或加热煮沸 1~2 h,或搅拌 3 h		浸出 20 h 以上,或搅拌 4 h
浸出液酸碱度	6≤pH≤7	6≤pH≤8	4≤pH≤5
沉淀剂或氧化剂加入量与有害物质量含量之比	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O(或 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·10H <sub>2</sub> O):BaCl <sub>2</sub> 为 1.5:1~2:1	NaClO:NaNO <sub>2</sub> 1.2:1~2:1	FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O:NaCN 为 3:1~4:1
沉淀或氧化反应时间(h)	1~2		
处理温度(℃)	25±10		

## 五、噪声及其防治

噪声是令人厌烦声音的总称,从物理意义上讲,噪声是紊乱、断续或统计上随机的声振荡,噪声能污染环境,但却没有污染物,噪声不会积累。工业企业厂界噪声标准见表 10-23。表中 I 类适用于居住、文教机关为主的区域。II 类适用于居住、商业、工业混杂区及商业中心区。III 类适用于工业区。IV 类适用于交通干线道路两侧区域。

夜间频繁发出的噪声(如排气的噪声)峰值不准超过标准 A 声级 10 dB,夜间偶然发出的噪声(如短促鸣笛声)峰值不准超过标准值 A 声级 15 dB。

对产生严重噪声的设备采取消声和隔声措施来达到噪声防治的效果。

表 10-23 工业企业厂界噪声标准(GB12348)

类别	昼间等效声级 <sup>①</sup> leq dB(A)	夜间等效声级 <sup>①</sup> leq dB(A)	类别	昼间等效声级 <sup>①</sup> leq dB(A)	夜间等效声级 <sup>①</sup> leq dB(A)
I	55	45	III	65	55
II	60	50	IV	70	55

注:① 等效声级是以 A 声级为基础建立起来的关于不稳态噪声的噪声评价量,以 A 声级稳态噪声代替变动噪声,记作 leq。

## 第六节 节能、清洁生产及热处理的能耗

### 一、节能

#### 1. 节能新理念

节能包括节约能源和提高能源利用的综合效率两方面内容。节约能源并不是简单地要求人们少用能源,降低人们的生活水平和物质的文明程度,而是指节省不必要的能耗。提高能源利用的综合效率是指让有限的能源物尽其用。对企业而言则强调通过技术进步提高能源利用效率,以增加效益、保护环境。

#### 2. 节能的重要意义

节能是解决环境问题、增强经济竞争力和确保能源安全的关键因素,是实施可持续发展战略的优先选择。

#### 3. 企业与建设节约型社会关系

企业是建设节约型社会的主体,要以尽可能少的资源消耗获得最大的经济效益和社会效益,建立节约型的生产模式和消费模式,走新型工业化道路。

企业是节能技术创新的主体,要把开发、生产和使用节能新工艺、新技术、新产品作为己任,加快高耗能产品和设备的改造和更新,推进企业节能技术进步。

建设节约型社会离不开建设节约型企业的参与。企业节约能源的潜力很大,意义重大,要走跨越式节能的道路。

### 二、清洁生产与循环经济

#### 1. 清洁生产概念

清洁生产是指不断采取改进设计、使用清洁的能源和原料、采用先进的工艺技术与设备、改善管理、综合利用等措施,从源头削减污染,提高资源利用率,减少或者避免生产、服务和产品使用过程中污染的产生和排放,以减轻或者消除对人类健康和环境的危害。即在产品生产过程和预期消费中,既合理利用自然资源,把对人类和环境的危害减至最小,又能充分满足人类需要,使社会经济效益最大化的一种生产模式。

#### 2. 实施清洁生产的途径和主要内容

(1) 改进设计。要充分考虑资源的有效利用和环境保护、生产的产品不危害人体健康、不对环境造成危害,产品要易于回收。

(2) 使用清洁能源,并尽可能采用无害、无毒的原料。

(3) 节能减排。

(4) 综合利用,包括废渣、余热、余能利用、水循环等。

(5) 改善管理,包括原料管理、设备管理、生产过程管理、产品质量管理、现场管理等。

### 3. 实施清洁生产体现的原则

清洁生产体现了集约型的增长方式和发展循环经济的要求,实施清洁生产体现四方面的原则:

(1) 减量化原则。资源消耗最小,污染物产生和排放最小。

(2) 资源化原则。将“三废”最大限度转化为产品。

(3) 再利用原则。将生产和流通中产生的废弃物作为再生资源,充分回收利用。

(4) 无害化原则。尽最大可能少使用或不使用有害原料以及减少和避免有害物质的产生和排放。

### 4. 循环经济的概念

循环经济指以资源节约和循环利用为特征的经济形态,也称为资源循环型经济。基本运行模式为自然资源→产品→再生资源→产品的循环方式,是相对于封闭式和非线性经济模式而言的。通过对经济运行的输入端、运行过程和输出端进行减量化、再利用、再循环控制,最终实现低消耗、低排放、低污染的循环经济目标。

### 5. 循环经济的特征

发展循环经济可以解决经济与环境之间长期存在的矛盾,达到经济与环境的双赢。循环经济的主要特征:

(1) 讲究资源的节约和有效利用,减少资源的投入,实现废弃物的减量化。

(2) 废弃物综合利用达到资源化。

(3) 对不能循环再生的废弃物进行无害化处理,使其不对环境带来污染。

### 6. 清洁生产与循环经济

清洁生产主要是从环境保护的角度强调单个企业内部生产的全过程控制,是企业层面循环经济的主要实现形式。而循环经济则是在更大空间范围内(相关的企业群、工业区、大环境)的清洁生产。

## 三、绿色热处理

从20世纪80年代开始,人类社会大力倡导以“保护环境,崇尚自然,促进持续发展”为核心的绿色时代。以节约能源、资源,实行环境保护,实现可持续发展为主题的绿色模式已成为各行业发展的新趋势。热处理行业提出的绿色热处理就是集材料、能源、环境、技术于一体的系统工程,符合可持续性发展战略。既是从节能、环保等方面出发,改造传统的热处理设备,改造传统的热处理工艺,加强热处理生产组织和技术管理,从而降低能耗,减少污染,提高劳动生产率和经济效益,保持热处理行业可持续发展的一项绿色工程,也是热处理行业实现零变形、零质量偏差、零污染目标的重要组成部分。

绿色热处理是绿色制造的重要组成部分,其内容涵盖:

(1) 强化金属材料,经合理热处理后,充分挖掘材料的潜力,节材降耗,为可持续性发展战略作贡献。

(2) 节约能源,保护环境。

(3) 清洁生产,采用无污染、无公害的热处理技术,对排放的有害物质进行有效控制和综合治理,最大限度地减少热处理对环境的污染,实现对热处理剩余物的再利用。

绿色热处理由绿色热处理技术和绿色辅助技术构成。

绿色热处理技术包括:

(1) 绿色材料选择。

(2) 绿色工艺设计,包括节能热处理工艺、复合热处理工艺等。

(3) 加热设备——采用生态能源、高效节能、环境友好性的设备。

(4) 绿色加热介质——应采用无毒、无污染具有环境友好性的加热介质。

(5) 绿色冷却介质——应采用无毒、无污染具有环境友好性的冷却介质,尤其应研究采用新的淬火方法获得最佳的淬火效果。

(6) 热处理剩余物的处理技术——实现热处理排放的废气、废水、废渣、粉尘等剩余物的再利用,治理好噪声和电磁辐射。

(7) 绿色能源——尽量采用可再生能源,提高能源利用率,加强能源的综合利用及余热回收。

绿色热处理辅助技术包括:

- (1) 建立健全热处理数据库。
- (2) 计算机控制热处理技术。
- (3) 热处理环境协调性评估。
- (4) 虚拟热处理技术。
- (5) 热处理管理技术。

#### 四、热处理的节能途径

热处理的节能途径见表 10-24, 热处理节能贯穿在热处理生产过程中的各个环节, 要在各环节, 包括生产组织、工艺技术、材料、设备、管理等多方面加以控制和不断改进。

表 10-24 热处理的节能途径(GB/Z18718)

节能途径	具体要求
通过有效的技术和管理, 使热处理能源获得最大程度的节约	加热设备的生产能力应和企业的生产纲领相适应; 对热处理件要根据工况、服役条件拟订合理的最节能的技术要求以及与之相适应的节能热处理方法和工艺; 采用高效高性能的节能钢, 如非调质钢、快速渗碳钢、新型高速钢等
热处理加热设备应连续使用和接近满负荷条件下工作	合理调配生产, 尽量使热处理炉连续开炉或定期满载开炉, 提高设备利用率, 减少停炉时的能源浪费, 尽量做到工件余热利用; 加热设备的负荷率不应低于 50%, 应三班连续生产和维持每周 5 天以上的开工时间
减少加热设备的热损失, 提高热效率	改进设备结构, 减少散热面积, 提高设备密封性, 采用陶瓷纤维或轻质砖炉衬, 减少炉子散热和蓄热损失, 减轻炉内耐热金属构件及工夹具的质量; 电阻炉加热的热效率不得低于 35%; 燃料炉加热的热效率不得低于 30%
回收利用燃烧废热、废气	利用燃烧废热预热空气(大于 300℃)
燃料在尽可能合理的条件下得到充分燃烧	燃烧嘴必须和燃料相适应, 燃烧的空气系数保持在 1.1~1.2 范围内, 并采用严格的控制温度和空气系数的自动调节系统
采用节能的热处理工艺	在满足技术要求的前提下, 优化热处理工艺, 缩短加热时间, 降低加热温度, 加速化学热处理催渗, 用局部热处理(感应、火焰淬火)代替整体热处理、感应淬火代替渗碳淬火。尽可能采用锻后热处理, 用直接加热代替间接加热, 表面加热代替透热加热等
企业设有专人管理能源, 并建立完善的管理制度	严格执行设备检修维护制度; 严格控制工装和工艺材料的品质; 避免违反工艺及设备操作规程的操作, 以免造成人为失误, 力求减少和避免返工、返修和报废

#### 五、热处理的工艺电耗定额与综合工艺电耗定额的计算(GB/T17358)

##### 1. 热处理工艺电耗定额的计算

以标准工艺电耗为基准, 根据各种热处理工艺的特点及实施条件, 结合有关统计数据来计算各种热处理工艺电耗定额:

$$N_i = N_b \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5$$

式中  $N_i$ ——某一种热处理工艺电耗定额 (kW·h/kg);

$N_b$ ——标准工艺电耗, 为 0.300 kW·h/kg;

$K_1$ ——折算工艺系数, 按表 10-25 确定;



$K_2$ ——加热方式系数,按表 10-26 确定;

$K_3$ ——生产方式系数,按表 10-27 确定;

$K_4$ ——工件材料系数,按表 10-28 确定;

$K_5$ ——装载系数,按表 10-29 确定。

表 10-25 常用热处理工艺的折算工艺系数  $K_1$

热 处 理 工 艺	折 算 系 数	热 处 理 工 艺	折 算 系 数
淬火	1.0	气体渗碳(渗层深<1.5 mm)	2.5
正火	0.8	气体渗碳渗层(深 1.5~3.0 mm)	3.5
退火	1.1	渗碳—淬火—回火(渗层深<1.5 mm)	3.2
球化退火	1.3	渗碳—淬火—回火(渗层深 1.5~3.0 mm)	4.2
去应力退火	0.6	碳氮共渗	1.7
固溶热处理(不锈钢)	1.8	氮碳共渗	0.6
高温回火(>500℃)	0.6	气体渗氮	1.8
中温回火(250~500℃)	0.5	离子渗氮	2.5
低温回火(<250℃)	0.4	感应淬火	0.5
时效(固溶热处理后)	0.4	冷处理	0.3

表 10-26 加热方式系数  $K_2$

加热方式	周期炉	连续炉	气氛炉	真空炉	浴炉 <sup>①</sup>	流态炉
系 数	1.0	0.9	1.1	1.6	2.0	1.6

注: ① 浴炉按一般生产习惯不加炉盖。

表 10-27 生产方式系数  $K_3$

生产方式	一 班	二 班	三 班
系 数	1.6	1.4	1.0

表 10-28 工件材料系数  $K_4$

工 件 材 料	低中碳钢或低中碳合金结构钢	合金工具钢	高合金钢	高速钢
系 数	1.0	1.2	1.6	3.0
合金元素总质量分数(%)	≤5	5~10	≥10	—

表 10-29 装载系数  $K_5$

装载方式	<30%额定装载量	30%~50%额定装载量	50%~80%额定装载量	>80%额定装载量
系 数 <sup>①</sup>	1.6	1.4	1.2	1.0

注: ① 感应淬火按  $K_5=1$  计。

## 2. 热处理综合工艺电耗定额的计算

包含有多种热处理工艺的车间,其综合工艺电耗定额:

$$N_z = N_1 T_1 + N_2 T_2 + \dots + N_n T_n$$

式中  $N_z$ ——热处理综合工艺电耗定额(kW·h/kg);

$N_1, N_2, \dots, N_n$ ——各种热处理工艺电耗定额(kW·h/kg);

$T_1, T_2, \dots, T_n$ ——各种热处理工艺处理的合格热处理件质量占总合格热处理件质量的百分比。

## 六、热处理的工艺燃料消耗定额与综合工艺燃料消耗定额的计算(GB/T19944)

### 1. 热处理工艺燃料消耗定额的计算

各种热处理工艺燃料消耗定额:

$$R_i = R_b \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5$$

式中  $R_i$ ——某热处理工艺燃料消耗定额(kJ/kg);

$R_b$ ——基准工艺燃料消耗量,为 2000 kJ/kg;

$K_1$ ——折算工艺系数,按表 10-25 确定,注意:其中氮碳共渗的数据应改为 0.7~0.8、气体渗氮的数据应改为 2.5、火焰淬火的数据应改为 0.5;

$K_2$ ——加热方式系数,按表 10-26 确定,注意:其中流态炉的数据应改为 1.3~1.4;

$K_3$ ——生产方式系数,按表 10-27 确定;

$K_4$ ——工件材料系数,按表 10-28 确定;

$K_5$ ——装载系数,按表 10-29 确定。

### 2. 处理综合工艺燃料消耗定额的计算

包含有多种热处理工艺的车间,其综合工艺燃料消耗定额:

$$R_z = R_1 T_1 + R_2 T_2 + R_3 T_3 + \dots + R_n T_n$$

式中  $R_z$ ——热处理综合工艺燃料消耗定额(kJ/kg);

$R_1, R_2, \dots, R_n$ ——各种热处理工艺燃料消耗定额(kJ/kg);

$T_1, T_2, \dots, T_n$ ——各种热处理的合格热处理件质量占总合格热处理件质量的百分比。

## 七、热处理加工万元产值能耗的统计计算

为了便于比较行业内生产企业的能耗水平,并鼓励企业节能降耗,热处理行业协会专门拟订了“热处理加工万元产值能耗”的考核指标。该指标计算方法简便实用,较为适合企业目前的现状,其计算方法如下:

### 1. 月(年)热处理加工总产值

月(年)热处理加工总产值:

$$T.O = \sum W_i (SP)_i \quad (\text{万元})$$

式中  $W_i$ ——为各热处理加工工序的质量(重量);

$(SP)_i$ ——为各热处理加工工序的指导单价,见表 10-30。

表 10-30 上海市热处理协会推荐热处理加工协作价格表

序号	处 理 工 序	单价(元/kg)	序号	处 理 工 序	单价(元/kg)
1	退火及回火(以电炉加热为主)		3	调质	
	高温退火( $\geq 900^\circ\text{C}$ )	1.30		箱式炉、台车炉( $< 950^\circ\text{C}$ )	1.70
	完全退火、球化退火等温退火	1.40		( $\geq 950^\circ\text{C}$ )	1.90
	再结晶退火、高温回火人工时效	1.00		井式炉(工件长 $\leq 1.5\text{m}$ )	2.00
	光亮退火、装箱退火	1.80		( $1.5\text{m} < \text{长} \leq 4\text{m}$ )	2.20
			(长 $> 4\text{m}$ )	2.30	
			高合金钢零件或形状复杂模具	3.00	
2	正火		4	盐浴炉淬火(等温冷却的加价 20%)	
	箱式炉正火( $\geq 950^\circ\text{C}$ )	1.10		碳素钢、低合金钢件	1.50
	( $< 950^\circ\text{C}$ )	0.90		高合金钢(包括一般模具) $\leq 950^\circ\text{C}$	2.00
	井式炉正火( $\geq 950^\circ\text{C}$ )	1.30		高速钢(三次回火)(清洗)	15.00
	( $< 950^\circ\text{C}$ )	1.10		高合金钢 $> 950^\circ\text{C}$	6.00
盐浴正火	1.40				

(续表)

序号	处 理 工 序	单价(元/kg)	序号	处 理 工 序	单价(元/kg)
5	保护加热淬火		12	碳氮共渗直接淬火	
	可控气氛炉加热	3.00		渗层 $\leq 0.4$ mm	3.00
	井式渗碳炉保护加热	2.20		渗层 $> 0.4$ mm	5.00
6	感应、火焰加热淬火		13	可控气氛碳氮共渗	6.00
	工频	2.50		气体氮碳共渗	5.50
	中频、超音频	1.00	14	渗氮	
	高频、火焰	1.50		气体渗氮	
	单齿加热淬火	2.00		渗层 $\leq 0.35$ mm	6.00
	小件局部淬火(单件 $< 0.5$ kg)	0.50元/只		渗层 $0.35 \sim 0.50$ mm	8.50
	钢导轨(不含校直)	11.00		渗层 $> 0.50$ mm	11.00
铸铁床身导轨 $\leq 1.5$ m	180/m	抗蚀渗氮	4.00		
铸铁床身导轨 $\geq 1.5$ m	280/m	离子渗氮	8.00		
7	冷处理(干冰+酒精)	5.50	15	含氮多元共渗	9.00
8	发黑处理	1.20		真空热处理	
9	磷化	3.00		真空淬火 $\leq 950^\circ\text{C}$	14.00
10	喷砂	0.80		真空淬火 $> 950^\circ\text{C}$ (高速钢)	17.00
				真空渗碳(渗层 $0.8 \sim 1.5$ mm)	16.00
11	渗碳		真空退火	8.00	
	渗碳直接淬火(渗层 $0.6 \sim 1.5$ mm)	4.50	真空回火	4.00	
	渗碳直接淬火(渗层 $1.5 \sim 2.0$ mm)	5.50	16	铝合金淬火+人工时效	3.00
	渗碳空冷(渗层 $0.8 \sim 1.5$ mm)	3.00	17	抛光	1.00
	渗碳空冷(渗层 $1.5 \sim 2.0$ mm)	3.50	18	校直 冷校(轴类) 热校(轴类)	0.80 1.20
	可控气氛渗碳淬火	5.50			
	深层可控气氛渗碳淬火	6.50			

2. 月(年)热处理加工总耗能

月(年)热处理加工总耗能:

$$T.E = \sum E_i \quad (\text{kW} \cdot \text{h})$$

式中  $E_i$ ——为生产的总耗电量以及总的燃料、水、油、辅料等消耗的费用折合成电耗量(即总的消耗费用除以每千瓦时的电价)( $\text{kW} \cdot \text{h}$ )。

3. 热处理加工万元产值能耗

月(年)热处理加工万元产值能耗 =  $T.O/T.E$ 。2006年规范企业基本达标条件,上海市为 $\leq 3.100 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{万元}$ ,全国为 $\leq 3.200 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{万元}$ 。

## 八、热处理炉用电可比单耗分等

根据热处理产品和工艺的不同,按相关规定将生产的合格产品折算成可比标准产品(折合质量)计算得出实际生产耗电量与产品折合质量的比值:

$$b_k = W/M_k$$

式中  $b_k$ ——测试期内热处理炉可比单耗( $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{t}$ ); $W$ ——测试期内热处理炉总耗电量( $\text{kW} \cdot \text{h}$ ); $M_k$ ——测试期内合格热处理件总折合质量( $\text{t}$ );

$$M_k = \sum m_i K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4$$

式中  $m_i$ ——在热处理炉处理的各种合格件的质量( $\text{t}$ );

$K_1$ ——产品(工件)单件质量折算系数,按表 10-31 确定;

$K_2$ ——产品(工件)类别质量折算系数,按表 10-32 确定;

$K_3$ ——热处理温度折算系数,按表 10-33 确定;

$K_4$ ——热处理工艺折算系数,按表 10-34 确定。

各类热处理电炉的可比单耗分等,见表 10-35~表 10-39。

表 10-31 产品(工件)单件质量折算系数  $K_1$

单件产品(工件)质量(kg)	>0.3	0.1~0.3	<0.1
$K_1$	1.0	1.2	1.5

表 10-32 产品(工件)类别质量  $K_2$

单件产品(工件)类别	工模具类	一般工件类
$K_2$	1.2	1.3

表 10-33 热处理温度折算系数  $K_3$

热处理温度(°C)	>1000	>700~1000	>500~700	>350~500	≤350
$K_3$	1.5	1.0	0.7	0.5	0.3

表 10-34 热处理工艺折算系数  $K_4$

热处理工艺	渗碳渗氮	盐浴	铝合金 淬火	钢材淬火	退火 保温时间>20 h	退火 保温时间 10~20 h	正火、退火 保温时间<10 h
$K_4$	2.0	1.5	1.2	1.1	1.7	1.3	1.0

表 10-35 箱式多用炉可比单耗分等(JB/T50182)

额定功率(kW)	可比单耗指标(kW·h/t)		
	一等	二等	三等
≤45	≤540	>540~680	>680~840
>45~75	≤480	>480~630	>630~760
>75	≤440	>440~560	560~700

表 10-36 电热浴炉可比单耗分等(JB/T50164)

工作温度(°C)	可比单耗指标(kW·h/t)		
	一等	二等	三等
>1000	≤680	>680~900	>900~1050
>700~1000	≤650	>650~850	>850~1000
>350~700	≤300	>300~400	>400~500
≤350	≤165	>165~210	>210~290

表 10-37 传送式、振底式、推送式、滚筒式热处理连续电阻炉可比单耗分等(JB/T50183)

炉 型	可 比 单 耗 指 标 (kW·h/t)		
	一 等	二 等	三 等
传送式	≤330	>330~390	>390~470
振底式	≤340	>340~400	>400~480
推送式	≤370	>370~460	>460~560
滚筒式	≤390	>390~480	>480~600

表 10-38 箱式台车电阻炉可比单耗分等(JB/T50162)

炉 型	额定功率 (kW)	可 比 单 耗 指 标 (kW·h/t)		
		一 等	二 等	三 等
箱 式	>15~30	≤400	>400~540	>540~660
	>30	≤350	>350~480	>480~600
台车式	>65	≤390	>390~530	>530~650

表 10-39 井式电阻炉可比单耗分等(JB/T50163)

炉 型	额定功率 (kW)	可 比 单 耗 指 标 (kW·h/t)		
		一 等	二 等	三 等
中温炉	≤75	≤460	>460~590	>590~700
	>75~125	≤420	>420~550	>550~650
	>125	≤400	>400~510	>510~600
回火炉	≤36	≤210	>210~270	>270~320
	>36	≤190	>190~250	>250~290
气体渗碳 (氮)炉	≤35	≤1 400	>1 400~1 550	>1 550~1 700
	>35~75	≤1 000	>1 000~1 230	>1 230~1 400
	>75	≤950	>950~1 090	>1 090

# 新技术展望

## 展望一 用于超高强度钢的淬火-碳分配-回火(沉淀)(Q-P-T)工艺

徐祖耀

为了节约能源和原材料及保护环境,急需提高钢件强度,减轻钢制品重量,降低钢铁产量。本文提出超高强度钢的成分设计和热处理工艺设计,并着重讲述这种工艺的应用。

### 一、Q-P工艺和Q-P-T工艺

人们对传统的钢热处理工艺(淬火+回火)已十分熟悉。例如对 T10 钢在淬火至室温获得马氏体 M+残留奥氏体 Ar 的组织,然后经过低温回火以消除应力。对这种钢的回火转变一般叙述为:① 马氏体中碳的偏聚;② 马氏体的分解;③ 残留奥氏体 Ar 的转变;④ 碳化物的转变;⑤  $\alpha$  相状态的变化及碳化物的聚集长大。由于淬火达到的温度较低和碳化物的析出较显著,人们往往会忽视残留奥氏体的作用。而实际上,在马氏体钢中残留奥氏体对延性和韧性具有显著作用。电镜实验指出,低碳钢经淬火后,具有富碳的残留奥氏体。后来人们受到含 Mn-Si 的 TRIP 钢(相变诱发塑性钢)的开发和含较高 Si 的钢空冷形成贝氏体、获得无碳化物贝氏体 B+铁素体 F+富碳奥氏体 A 的启示,了解到含一定量奥氏体的淬火钢在一定温度下回火(或称分配处理),碳会从马氏体向奥氏体扩散富集,使残留奥氏体富碳而稳定。早在 1981 年,Thomas 等就发现了这种现象<sup>[1]</sup>。在 1983 年徐祖耀等以计算证明了淬火中条状马氏体中的碳向残留奥氏体 Ar 富集的扩散<sup>[2]</sup>。但直到 2003 年美国科罗拉多州(Colorado)矿业学校冶金和材料工程系的 Speer 等<sup>[3,4]</sup>提出将中碳高硅钢(0.35C-1.3Mn-0.74Si)进行淬火后在  $M_s \sim M_f$  间的一定温度等温,碳由马氏体分配至残余奥氏体,使奥氏体稳定以提高钢的塑性和韧性的工艺,提出“马氏体类型钢热处理新工艺 Q-P 工艺(淬火与分配工艺,Quenching and Partitioning process),从而引起广泛的兴趣。淬火-碳分配-回火(沉淀)的 Q-P-T 热处理新工艺[Quenching-Partitioning-Tempering (Precipitation)]是于 2007 年提出对 Q-P 工艺进行改造而发展出来的<sup>[5-7]</sup>。这是在 Q-P 工艺上引入复杂的碳化物弥散沉淀强化的工艺,即在钢中加入特殊碳化物形成合金元素如 Nb 和(或)Mo,从而使淬火钢具有更高的强度。

### 二、Q-P-T 钢的显微组织、性能、成分和热处理设计<sup>[6]</sup>

(1) Q-P-T 钢的成分: Q-P-T 钢的基本化学成分列于表 1。钢中加入(1%~2%)Mn 或(和)Ni 是降低钢的  $M_s$  点;加入(1%~2%)Si 是阻碍渗碳体( $Fe_3C$ )的析出,或加入 1%Al 代替;加入 0.02% Nb 或(和)0.2% Mo,使奥氏体晶粒细化和在回火时析出弥散的复杂合金碳化物。

表 1 Q-P-T 钢的基本化学成分范围

合金元素	C	Mn	Si	Nb
wt%	<0.5	1~2	1~2	0.02

(2) Q-P-T 钢的热处理工艺: Q-P-T 钢的热处理工艺见图 1,图中 AT、QT、PT、TT 和 RT 列于表 2 中。

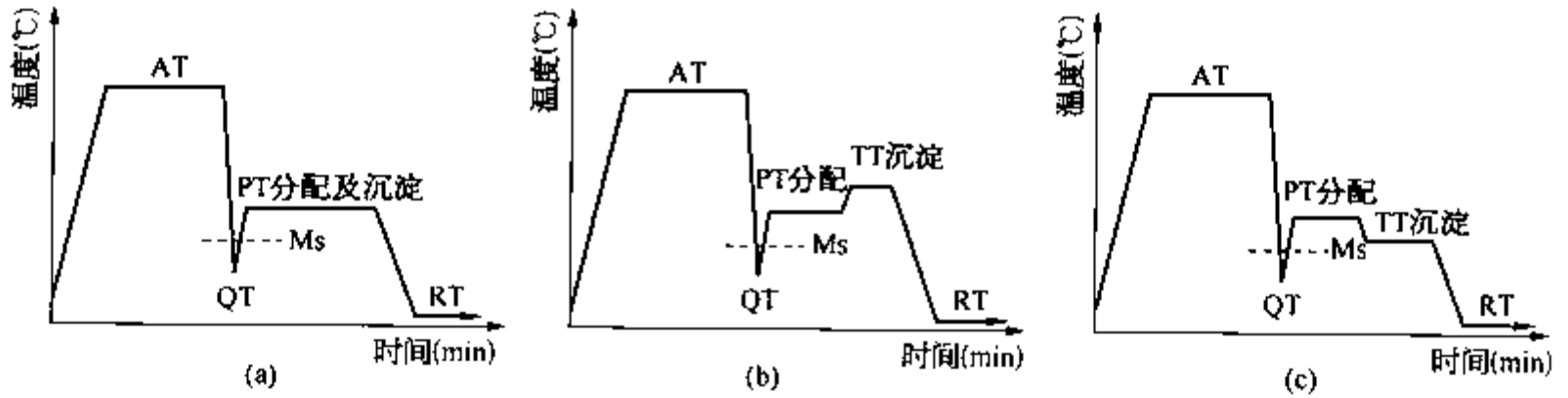


图1 淬火-碳分配-回火(沉淀)(Q-P-T)工艺示意图  
(a)  $PT=TT>QT$ ; (b)  $TT>PT>QT$ ; (c)  $PT>TT>QT$

表2 AT、QT、PT、TT和RT的温度范围

符号	AT	QT	PT	TT	RT
意义	奥氏体化温度	淬火温度	分配温度	回火(沉淀)温度	室温
温度范围	略 $>Ac_3$	$Ms\sim Mf$	$>QT$	$TT=PT, TT>PT, TT<PT$	

设计的 Q-P-T 热处理工艺为：较低温度 AT 奥氏体化，淬火至一定温度 QT(或  $T_q$ ) 以获得适量的马氏体量。这将是决定钢的最终强度的主要因素之一。在 PT 温度，马氏体中的碳扩散(分配)至邻近残留奥氏体。在 TT 温度，自马氏体中沉淀析出弥散的  $\epsilon$ (或  $\eta$ ) 合金过渡碳化物，TT 温度可在 PT 温度进行或在 PT 较高或略低温度下进行，TT 处理后水淬至室温 RT。

(3) Q-P-T 钢的显微组织及其性能：Q-P-T 钢的显微组织为较薄纳米级的条状马氏体，包有相当厚度的残留奥氏体为基体，马氏体上析出弥散的复杂合金碳化物，但不含脆性的渗碳体，并且其奥氏体晶粒应细化。

注意：Q-P-T 钢的奥氏体化、淬火温度、分配温度和停留时间以及在回火(沉淀)温度和时间决定马氏体量及其含碳量、残留奥氏体量及其含碳量以及弥散合金碳化物的量和形态，从而决定钢的强度、断后伸长率和韧性等力学性能指标。

徐祖耀指出<sup>[6]</sup>，按设计超高强度钢大致成分的钢进行 Q-P-T 处理后，获得钢的抗拉强度  $R_m > 2000$  MPa，总断后伸长率  $A > 10\%$ 。它和双相(DP)钢、TRIP 钢、一般马氏体(M)钢、含 Ni 钢和 Q-P 处理的钢板的力学性能对比见图 2。

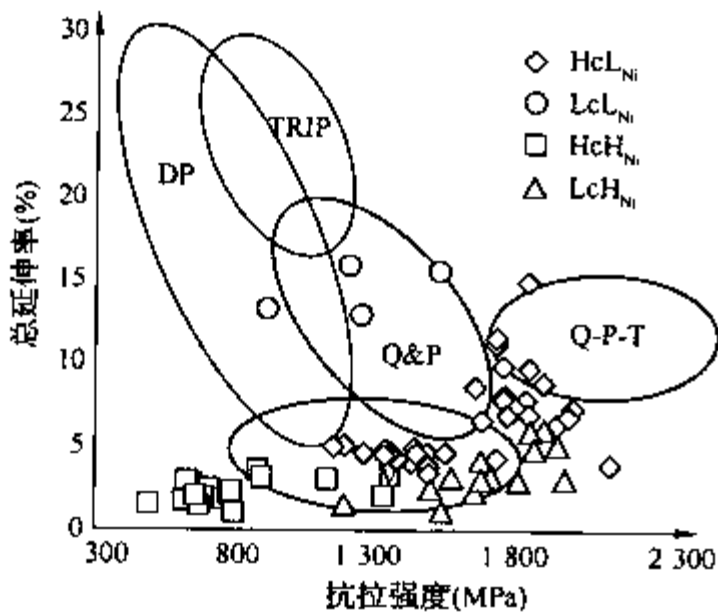


图2 双相(DP)钢、TRIP 钢、一般马氏体(M)钢、Q-P 钢、含 Ni 钢和 Q-P-T 钢的  $R_m$  及 A 比较

### 三、Q-P-T 工艺的典型应用

成分为 0.485C - 1.195Mn - 1.185Si - 0.98Ni - 0.021Nb(质量分数) 钢件进行如下的 Q-P-T 处理：850℃ 奥氏体化 300 s，淬火至 95℃ 盐浴中保温 10 s，再加热至 400℃ 盐浴进行碳分配及碳化物沉淀后水淬至室温，分配和沉淀时间为 10 s、30 s、60 s、300 s。

400℃ 10 s 分配和沉淀后零件的抗拉强度  $R_m$  达 2160 MPa，断后伸长率 11%<sup>[7]</sup>，这可能是  $a_k < 0.5\%$ ，具有相当塑性的最高强度等级马氏体钢。残留奥氏体量由淬火态的 4.1% 增至 6.4%。试验揭示，因复杂碳化物的析出，钢件的抗拉强度比淬火态增高 130 MPa。分配和沉淀时间小于 60 s 的保持  $R_m > 2000$  MPa。淬火、并经 400℃ 10 s 分配和沉淀的上述钢的组织为几十纳米厚度的条状马氏体，其外包有纳米级厚度的残留奥氏体以及纳米级直径的含 Nb 复杂碳化物；随分配时间的延长，残留奥氏体量将减少，强度也将下降。

分配工艺还可用于钢件表面或特殊部位(使该部位在淬火时不发生相转变)略为增碳，提高该部位的强度，

代替渗碳<sup>[5]</sup>。

应用分配工艺创建条件较大程度增碳使奥氏体稳定化,呈现韧化效应。对钢件或渗碳件淬火后需提高韧度的,均可应用碳分配工艺<sup>[5]</sup>。

### 参考文献

- [1] M. Sarikaya, G. Thomas. Lath martensite in carbon steels are they bainitic? [A]. Proc. Inter. Conf. Solid to solid phase transformation, 1981, Ed. H. I. Aaronson et al. TMS-AIME, 1982, 999 - 1004
- [2] T Y Hsu (Xu Zuyao), Li Xuemen. Diffusion of carbon during the formation of low-carbon martensite [J]. Scripta Metall. 1983, 17, 1285 - 1288
- [3] D. K. Matlock, V. E. Bräutigam, J. G. Speer. Application of the quenching and partitioning (Q&P) process to a medium-carbon high Si microalloyed bar steel [J]. Mater. Sci. Forum, 2003, 426 - 432; 1089 - 1094
- [4] J. G. Speer et al. Carbon partitioning into austenite after martensite transformation [J]. Acta Mater., 2003, 51, 2611 - 2622
- [5] 徐祖耀. 钢热处理的新工艺[J]. 热处理, 2007, 22(1): 1 - 11
- [6] T. Y. Hsu (Xu Zuyao). Design of structure, composition and heat treatment process for high strength steel [J]. Invited paper, pacific Rim Inter. Conf. Advanced materials and Processing, 2007, Korea, Phase Transformation Session, Mater. Sci. Forum, 2007, 561 - 565; 2283 - 2286
- [7] 徐祖耀. 用于超高强度钢的淬火-碳分配-回火(沉淀)(Q-P-T)工艺[J]. 热处理, 2008, 23(2): 1 - 5

## 展望二 计算机模拟在热处理中的应用

潘健生 顾剑锋

### 一、引言

热处理过程的计算机模拟(也称为数值模拟)是借助电子计算机将材料学、传热学、弹塑性力学、流体力学和数学等多学科的理论知识加以集成,建立定量描述热处理过程中各种现象及其相互作用的数学模型,对热处理生产条件下工件内温度、浓度、组织和应力与应变的变化情况进行模拟,使人们得以在虚拟现实的环境下获得对整个工艺过程的规律性的认识,在工件内部的组织和性能分布,残余应力分布和工件形状变化等正确预测的基础上制订出最优化的热处理工艺的科学方法。因此,热处理数学模型和计算机模拟是改变传统技艺型热处理技术的落后状态,向着高度知识密集型技术的方向发展的重要途径,成为当前国际热处理领域的发展前沿。例如目前美国国家制造科学中心组织了通用汽车、福特汽车、特灵顿轴承三大工业集团、三家软件公司和多所大学的国家实验室等多个实力雄厚的单位组成合作研究的组织,投入 2 500 万美元从事渗碳淬火畸变计算机模拟工具的开发研究。这从一个侧面反映出国外对热处理数学模型与计算机模拟技术的重视程度。当前制造业对产品性能的要求愈来愈高,我国制造业也面临着严峻的挑战,作为热处理工作者,有必要关注热处理计算机模拟的发展动态,在技术创新中应用计算机模拟的研究成果,才能更好地适应形势发展的要求。

### 二、回顾

早在 20 世纪 70 年代已有人研究在温度化过程和发生组织转变时的应力和应变行为。80 年代初先后建立了温度—相变耦合以及温度—相变—应力三者耦合的数学模型,如图 3 所示。图中①表示温度场对相变的作用,即加热或冷却速度对相变发生的时间和温度区间的影响;②表示相变对温度场的作用,相变潜热改变了升温曲线或冷却曲线;③表示温度场对应力场的作用,钢的比容随温度差而改变,工件内部的温度差造成不同部位的热胀冷缩不同步而产生热应力;④表示相变对应力场的作用,由于不同组织的比容不同,在相变发生时引起“组织应力”;⑤表示应力场对相变的作用,应力对相变进展的速度(相变动力学)有一定影响;⑥表示应力场对温度场的作用,应力影响相变潜热产生的时间,从而影响加热或冷却速度。

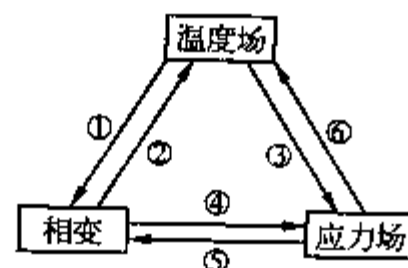


图3 加热或冷却过程中温度场—相变—应力场三者耦合的示意图



正因为存在各种因素之间的复杂的交互作用的耦合关系,在计算机模拟中必须用反复叠代的方法求解。

多年来经过各国学者的不断努力热处理数学模型和计算机模拟的研究取得很大的进展,求解非线性瞬态温度场的数值方法已相当成熟,非等温的连续冷却或加热的相变计算、温度场—相变耦合模型等研究成果为工件内相变过程的计算机模拟创造了条件。在热应力与组织应力的计算方面,近年来广泛采用有限单元法和热弹塑性模型,有些作者采用了相当复杂的数学模型,在应变量计算中考虑了弹性应变、塑性应变、热应变、相变应变和相变超塑性,在塑性区处理中考虑了屈服模型和应变强化。另一些文献研究了应力对相变动力学的影响。上述一系列研究成果为温度—相变—应力相互耦合的计算机模拟打下了良好的基础。

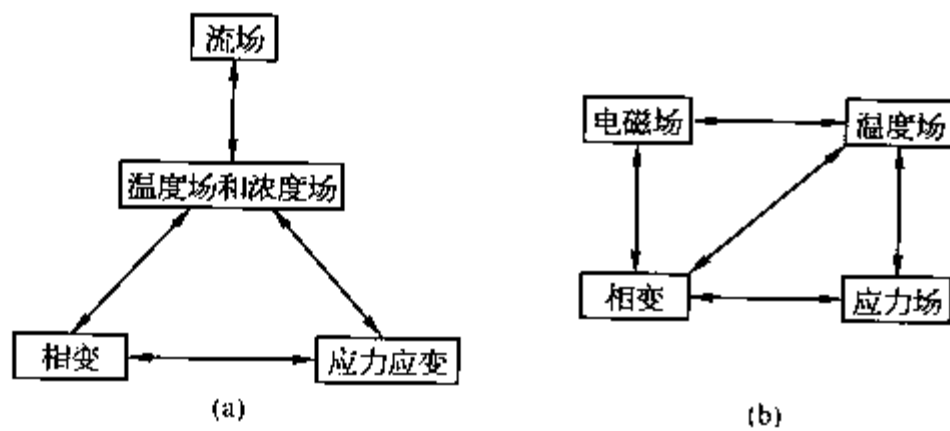


图4 在热处理数学建模中引入流场(a)和电磁场(b)的示意图

气体渗碳和渗氮的数学模型和计算机模拟在20世纪70年代国际上已开展了研究,至80年代就已相当成熟,在国内外已应用于工业生产。

在计算机模拟技术中引入流场动力学模拟和电磁场的模拟是在20世纪末以来热处理数学建模的重要发展趋势(图4),也进一步提升了热处理计算机模拟技术的功能。

### 三、热处理计算机模拟的应用实例

#### 1. 阶梯轴加热的计算机模拟与工艺优化

某厂 $\phi 380$  mm阶梯轴,淬火加热用 $3 \times 6$  m<sup>2</sup>台车式煤气炉进行淬火加热,原工艺的总加热时间超过20 h。用三维瞬态温度场数值模拟方法进行计算机辅助工程分析(CAE),以求优化加热规范、缩短加热时间。首先,需要对所采用的数学模型和计算机模拟软件进行实验验证。

1) 三维温度场计算机模拟的实验验证 试验材料45和40Cr钢先后在四种不同加热炉(如盐浴炉、箱式炉和 $3 \times 6$  m<sup>2</sup>台式煤气炉等)中进行过20炉次测定,工件形状有长方体(如 $40$  mm $\times$  $40$  mm $\times$  $90$  mm)、轴、阶梯轴(如 $\phi 380$  mm $\times$  $1750$  mm)和圆筒。升温曲线的计算值与实测值均吻合良好(见图5和图6)。故可认为所采用的数值模拟方法及相变潜热的处理方法是正确的,相应的软件已具有实用价值。

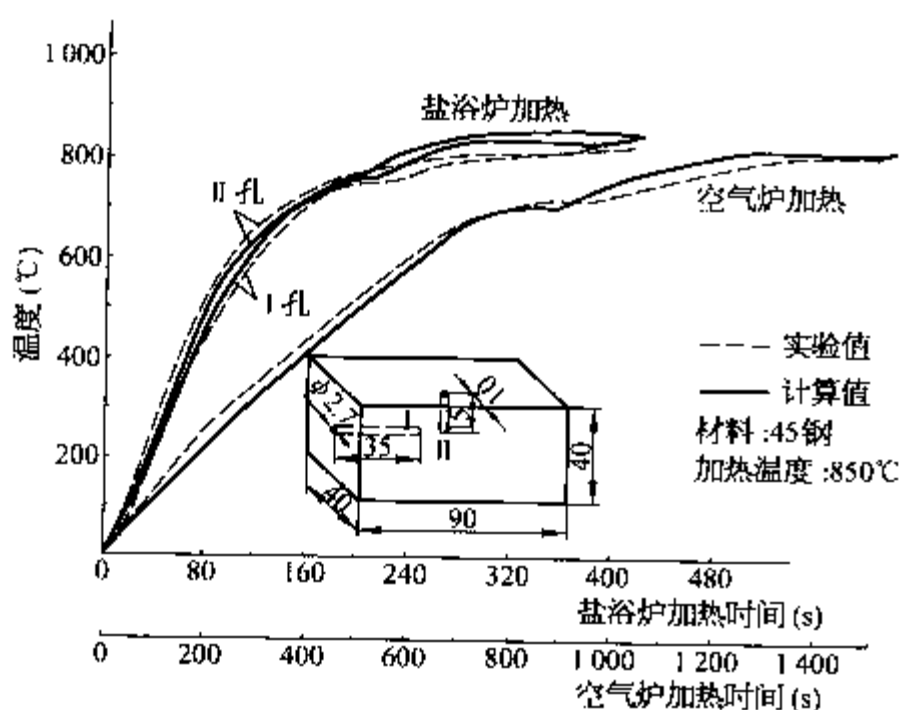


图5 长方体工件在炉中加热升温曲线计算值与实测值比较

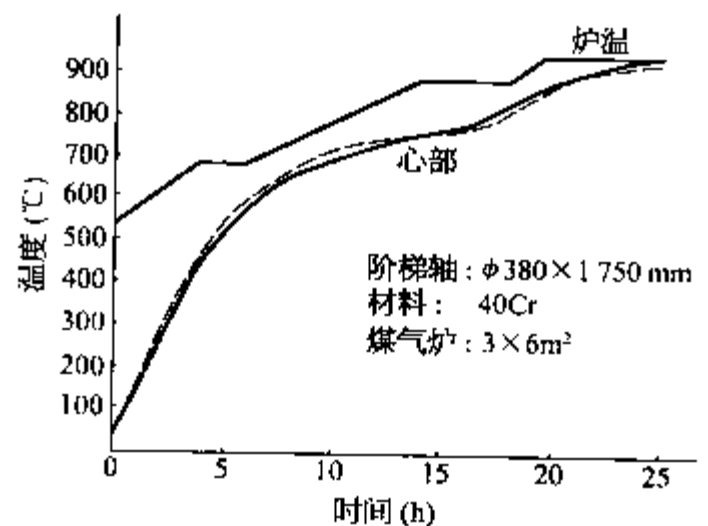


图6 阶梯轴在煤气炉中心部升温曲线与实测结果比较(40Cr钢)

2) 优化加热工艺的 CAE 技术 40Cr 钢  $\phi 380 \text{ mm} \times 1750 \text{ mm}$  阶梯轴, 在  $3 \times 6 \text{ m}^2$  煤气炉中加热, 原工艺采用  $550^\circ\text{C}$  进炉,  $650^\circ\text{C}$  均温 2 h。然后以  $25^\circ\text{C}/\text{h}$  升温至  $850^\circ\text{C}$ , 待工件表面到温后, 均温 3.5 h。总加热时间超过 20 h。应用 CAE 技术的计算结果表明: 取消  $650^\circ\text{C}$  中间保温, 工件最大温差仍然不太大, 不会发生加热开裂等不良后果, 总加热时间可缩短到 17 h。计算结果由实验证实, 并预示有可能进一步提高加热速度。于是设计了六种工艺方案(图 7), 进行温度场的模拟计算, 并对其中之一进行试验验证。六种工艺的效果如表 3 所示, 其中工艺 6 加热时间最短, 表面和心部温差的峰值约为  $60 \sim 70^\circ\text{C}$ , 角点与心部温差也只有  $120 \sim 130^\circ\text{C}$ (图 8), 比允许值小得多, 因而是可行的。显然, 这种数值模拟可以用来确定最优化的加热工艺分法, 这要仅靠实验方法确定是不可能的。

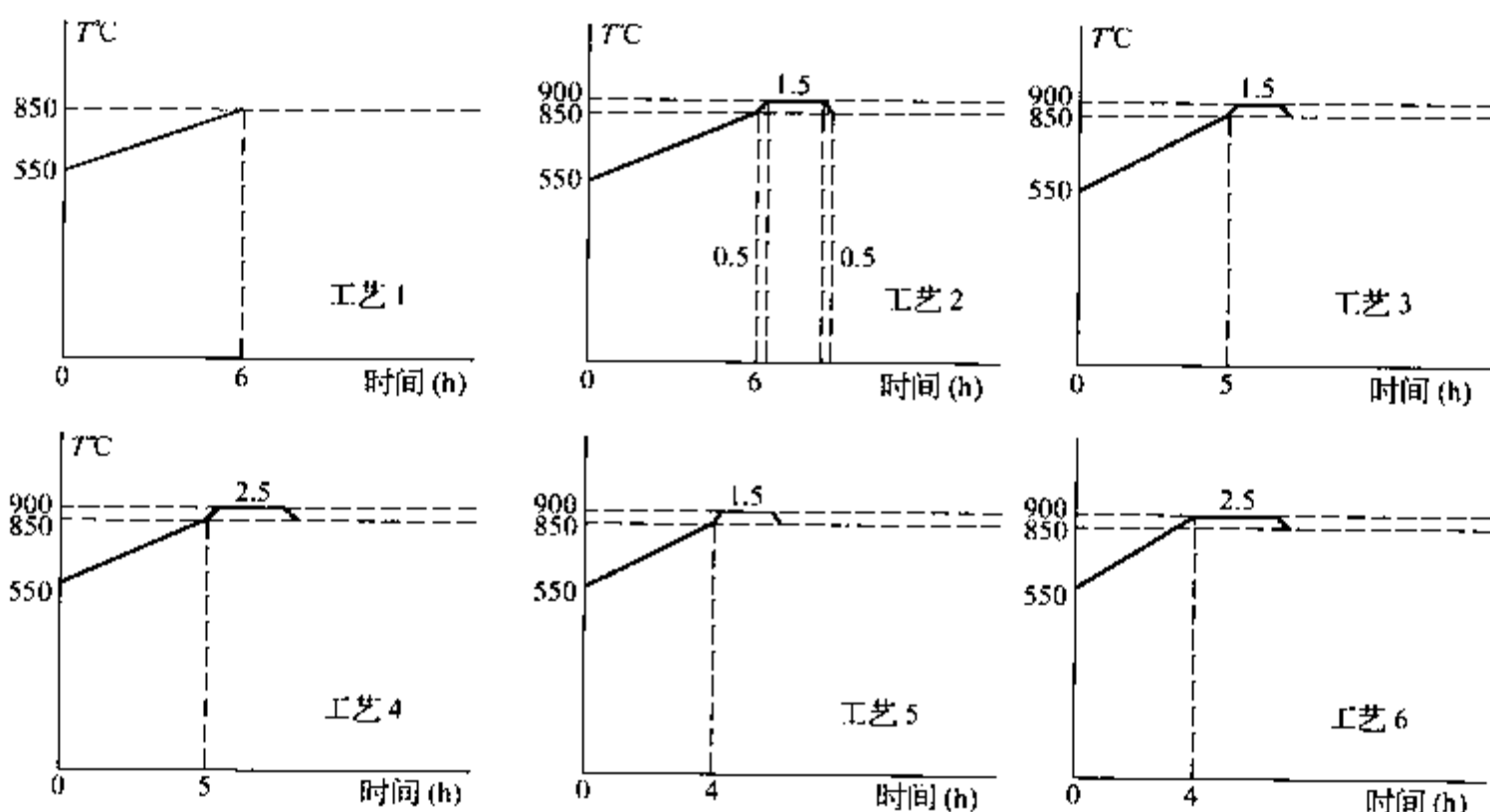


图 7 阶梯轴加热六种工艺方案

表 3 阶梯轴加热六种不同工艺的效果

工艺要求	原工艺方法	取消 $650^\circ\text{C}$ 中间保温方法	工艺 1	工艺 2	工艺 3	工艺 4	工艺 5	工艺 6
心部到温时间(h)	22	17	12.25	11.75	11.67	11.25	11.25	11.00
工艺缩短时间(h)		5	9.75	10.25	10.33	10.75	10.75	11.00

2. 125MN 挤压机主柱塞差温加热数值模拟

125MN 挤压机是国家急需的能体现国家实力的重型工艺装备, 属极端制造范畴。其油压机主柱塞直径  $2.168 \text{ m}$ , 重约  $150 \text{ t}$ , 用 45 钢制造, 要求柱面表面淬硬层深度达  $10 \text{ mm}$  以上。其结构和使用的加热炉见图 9。我们采用差温加热方法, 当工件的表面完全奥氏体化层超过  $10 \text{ mm}$  时进行出炉, 这时工件内保持较大的温度梯度, 减少其整体蓄热量, 有助于提高工件出炉后续喷水时的冷却速度, 以求使淬透性低而又体积巨大的柱塞达到必要的淬硬层。

制造厂现有的井式加热炉的内径只有  $\phi 2310 \text{ mm}$  能否用于进行直径达  $\phi 2168 \text{ mm}$  的柱塞加热? 采用怎样的加热规程才能达到差温加热的目的? 由于没有相近的先例, 无法根据现有的经验给出答案, 需要采用计算机模拟技术进行工程分析。一般工件在炉内加热的数

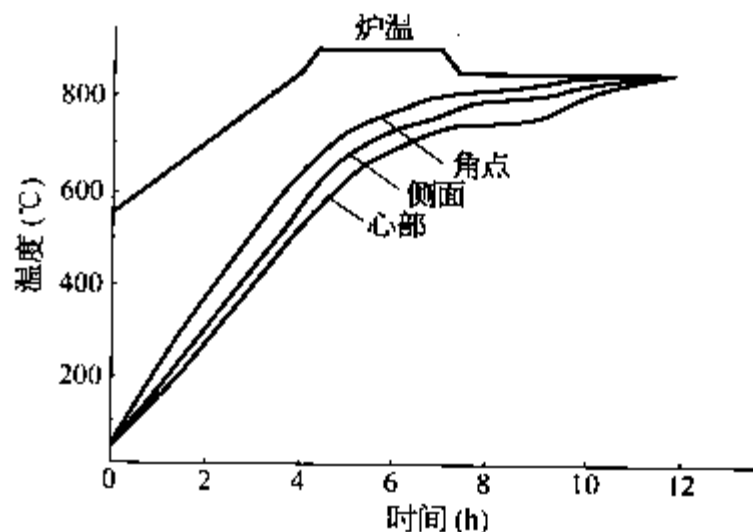


图 8 阶梯轴心部、侧面、角点加热曲线(工艺 6)

学模型是以炉内空间作环境,以工件作为求解域,根据炉温的变化用第三类边界条件求解工件内部非稳态温度场。但是柱塞的体积占炉内空间很大的比例,在额定功率下炉温的升温曲线也是未知的,所以现有的炉内工件加热的数学模型已无法适用。为此,建立了图 10 所示主柱塞差温加热模拟的数学模型,这是一个多体“耦合传热”的模型,可以将工件、发热体和炉壁、炉底、炉盖作为一个整体进行求解。图 11 是经 300℃ 和 550℃ 二次阶梯加热之后 2 000 kW 加热炉全功率快速升温时主柱塞外表面和内表面升温曲线及温度差的模拟结果。经 2 520 min 加热之后外表面已达奥氏体化温度,而内部温度约 600℃。图 12 是差温加热结束时温度场云图。图 13 是主柱塞的顶部、中部和底部温度场云图的局部放大。

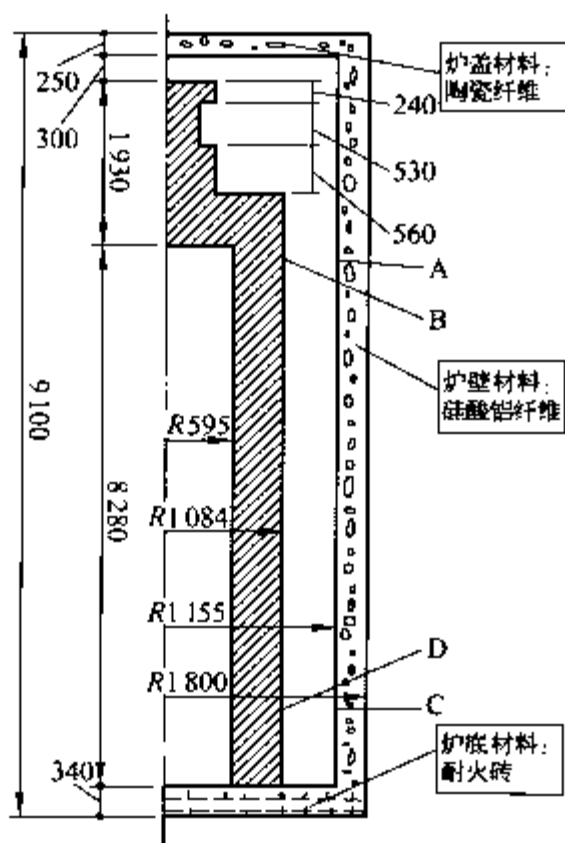


图 9 125MN 挤压机主柱塞与加热炉

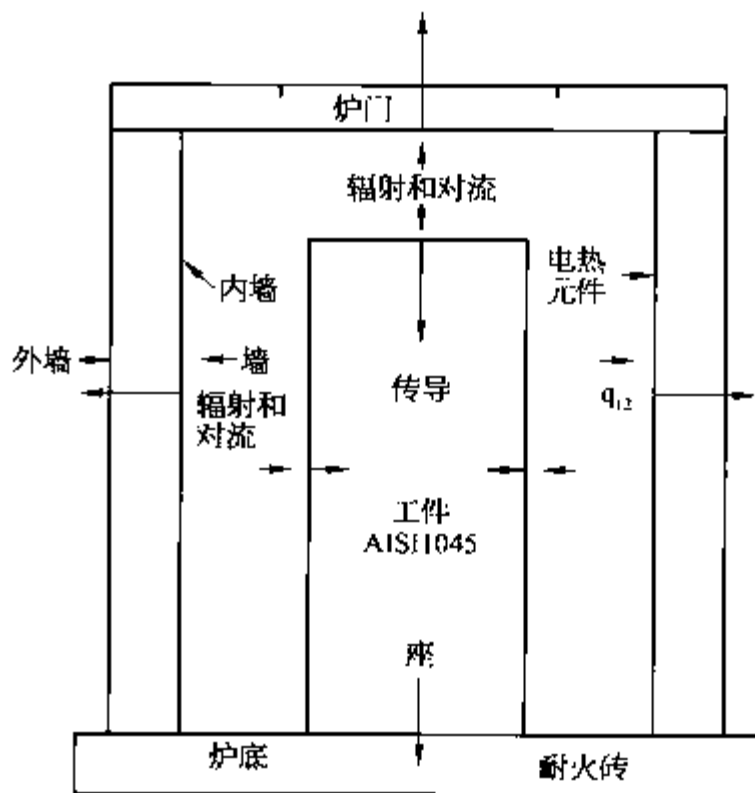


图 10 主柱塞在 2 000 kW 井式炉内加热模型

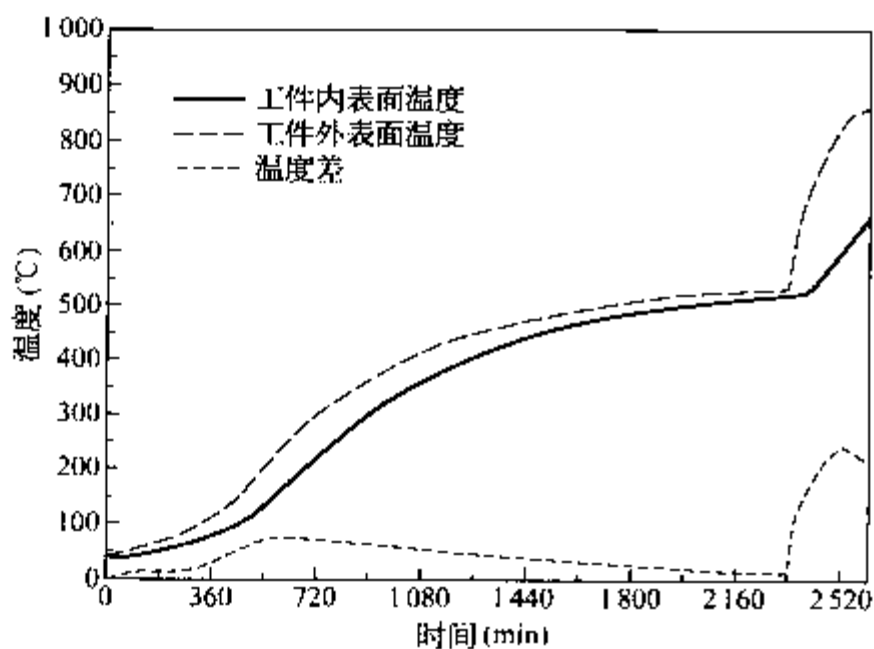


图 11 主柱塞外表面与内表面温度变化模拟结果

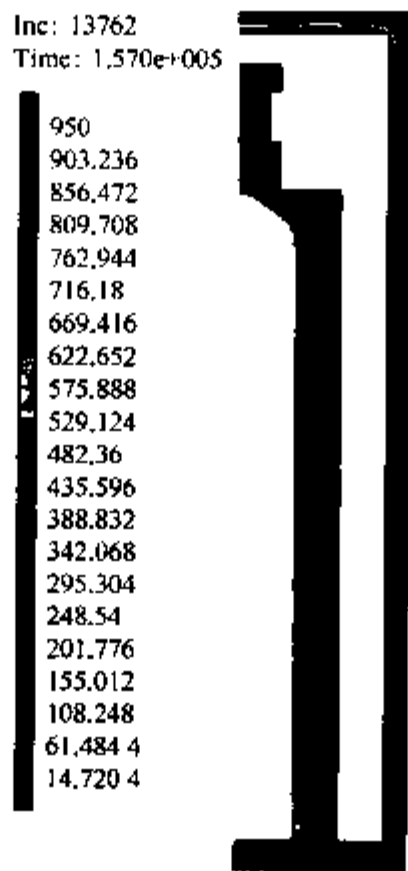


图 12 主柱塞加热温度场的模拟结果

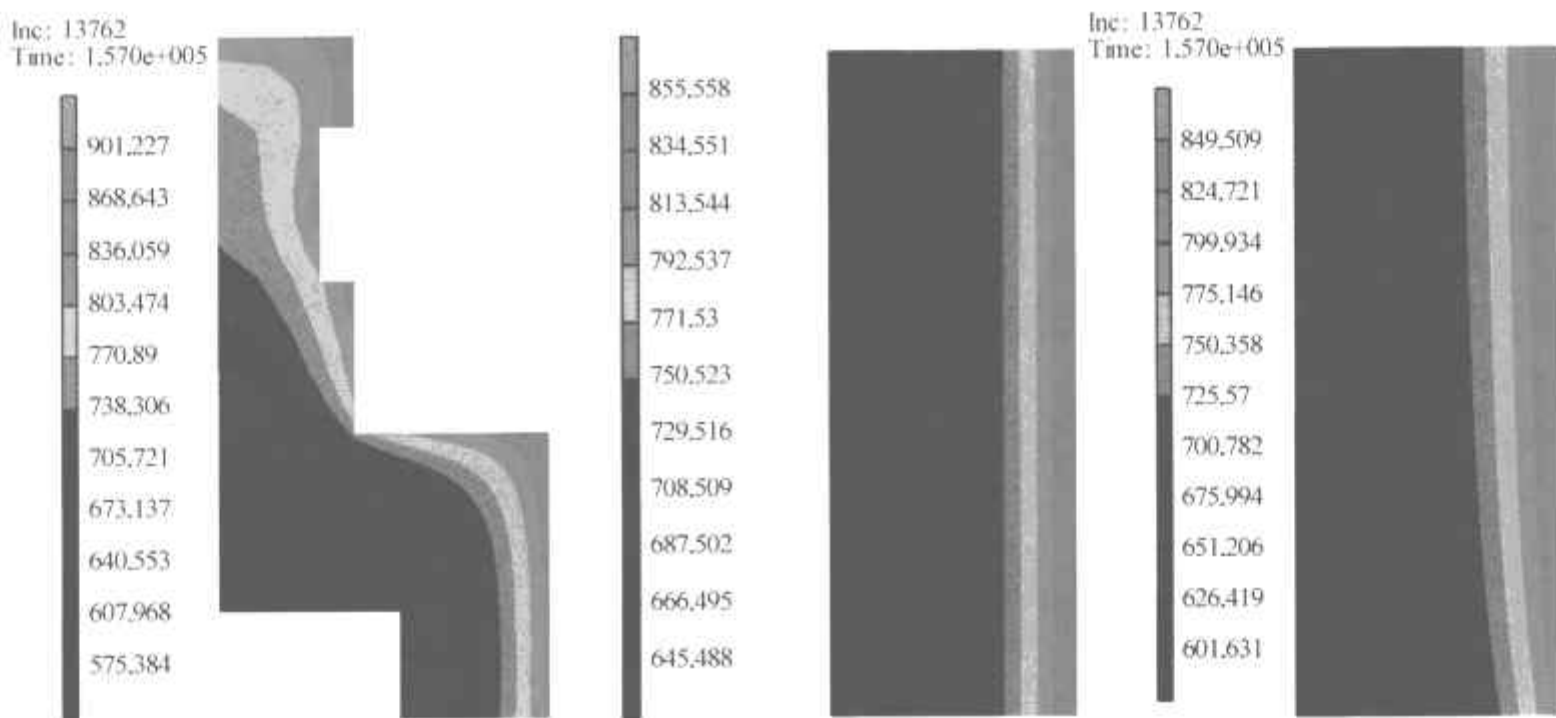


图 13 主柱塞加热结束时顶、中和底部温度场云图

图 14 和图 15 是差温结束时工件内组织分布的模拟结果,考虑到模拟计算可能存在的误差以及生产现场的复杂性,用模拟方法制订工艺参数时要考虑足够的宽容度。因此按奥氏体层深度达到 50~70 mm 作为加热完成的判据。



图 14 差温加热结束时工件内组织分布模拟结果

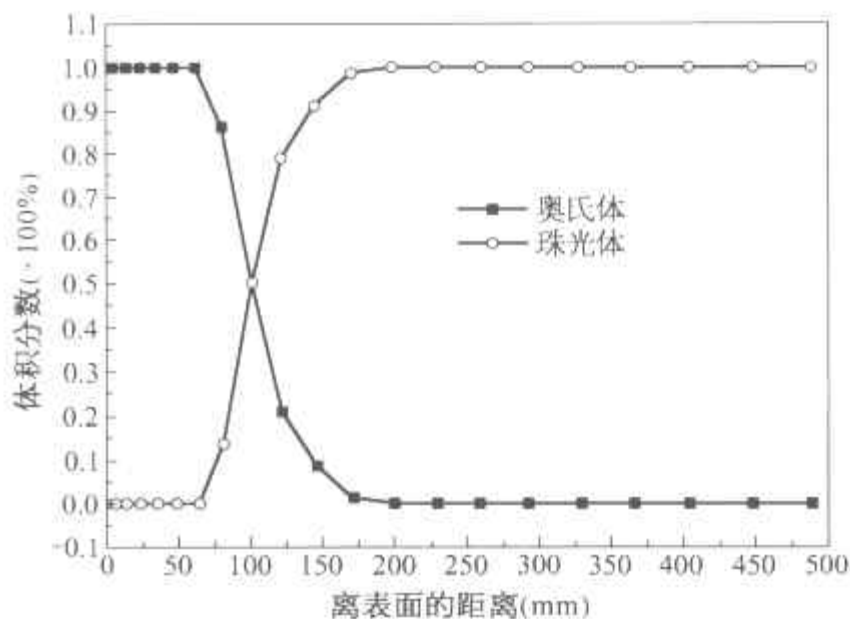


图 15 差温加热后截面上的组织分布曲线

实际生产时在图 9 所示的 A、B、C、D 处安装了四支监控热电偶。实测的曲线与模拟的温度曲线大致接近(图 16、图 17)。于是按预设判据结束加热,出炉喷水冷却,质量检验结果符合设计要求,收到了一次投产成功的效果,满足了重大工程的急需。

### 3. 高硬冷轧辊淬火工艺 CAE

高硬冷轧辊形状与尺寸如图 18 所示,要求淬火后的辊身硬度 $\geq 62\text{HRC}$ ,并希望在表层形成压应力层。一般用油淬火则辊身硬度达不到技术要求,采用水淬则易淬裂。

应用温度—相变—应力应变三者耦合的模型进行高硬冷轧辊淬火的计算机模拟。对不同淬火介质冷却过程中的组织和应力应变过程进行分析,发现选用“三硝水溶液”(25%  $\text{NaNO}_3$ , 20%  $\text{NaNO}_2$ , 20%  $\text{KNO}_3$ , 35%  $\text{H}_2\text{O}$ )淬火后能获得合适的组织分布(图 19、图 20、图 21)。中间剖面上各点淬火冷却曲线如图 22 所示。

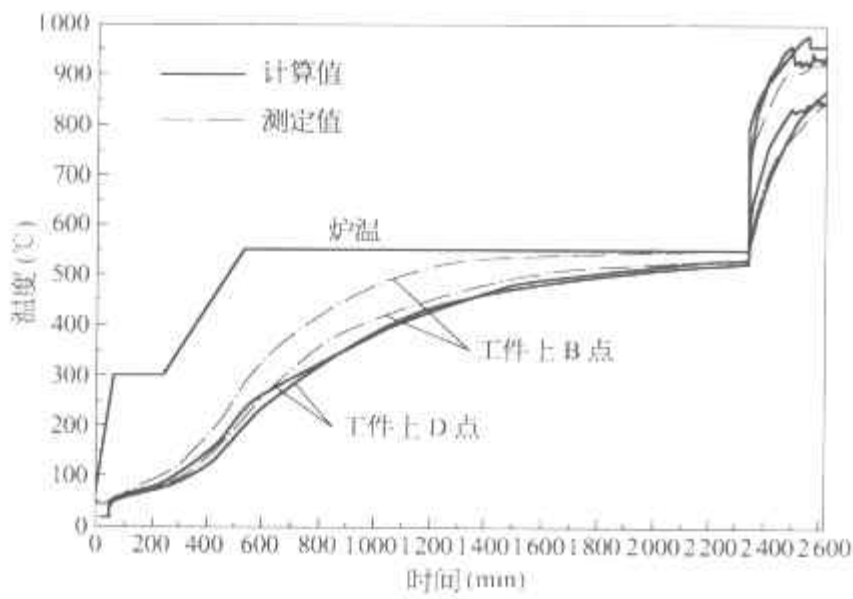


图 16 温度变化曲线的模拟值与生产实测值

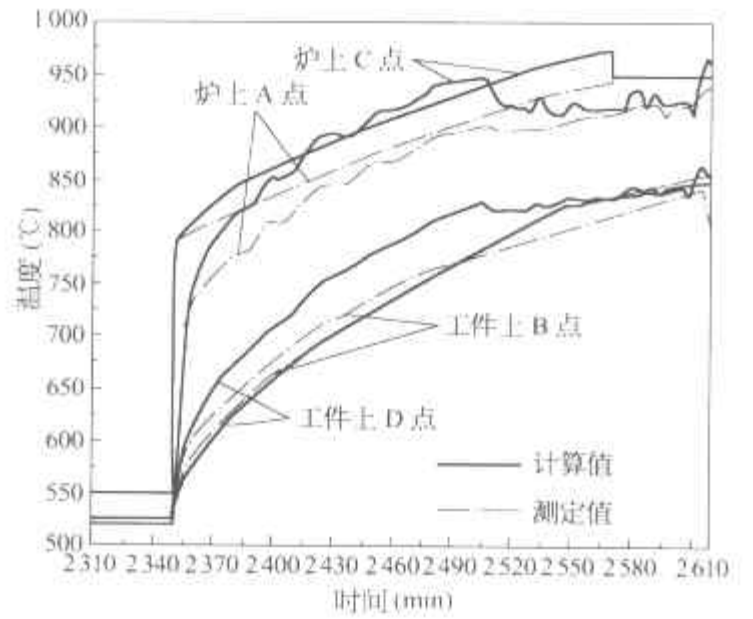


图 17 快速升温阶段的温度变化曲线模拟值与实测值

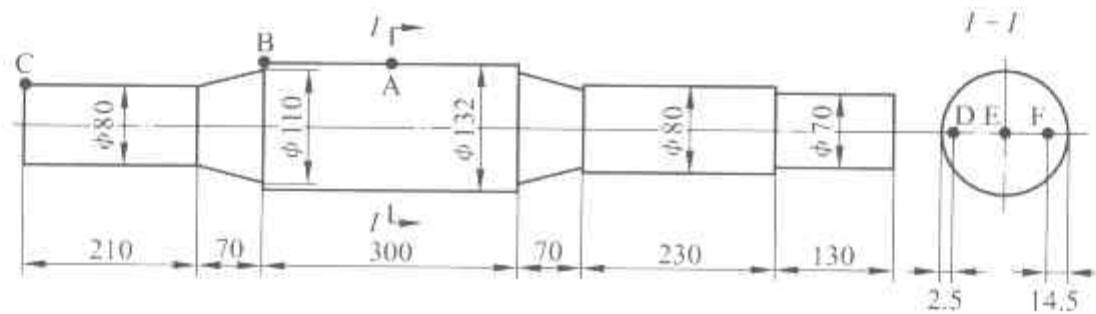


图 18 高硬冷轧辊

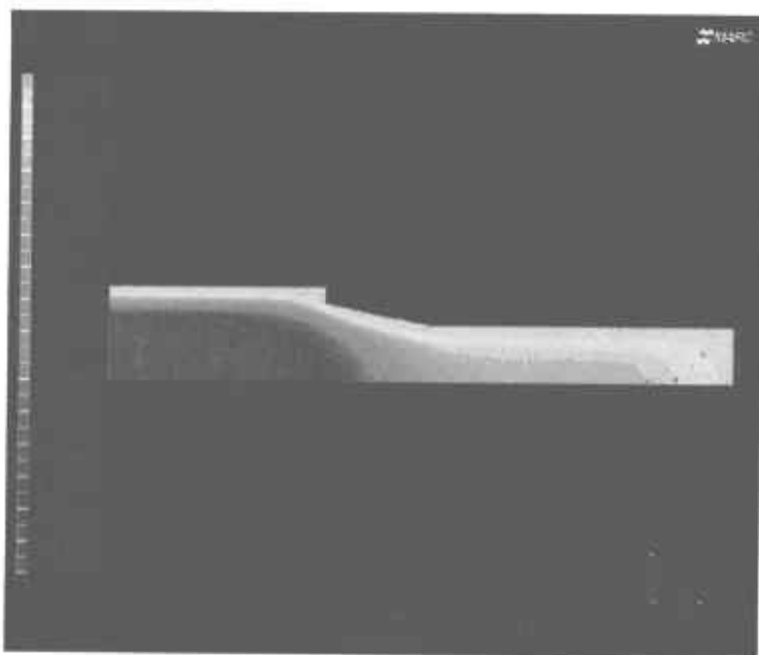


图 19 用三硝水溶液淬火后轧辊的剖面上马氏体量分布云图

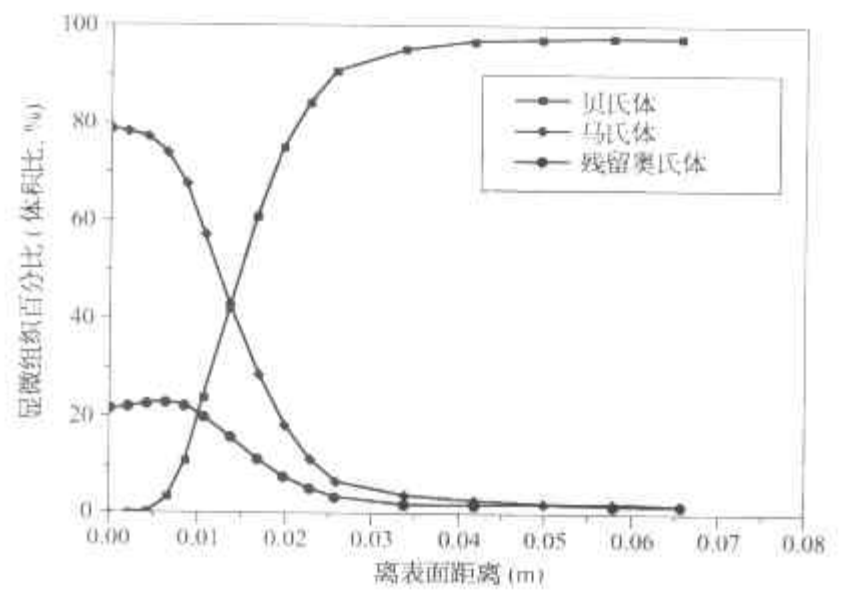


图 20 用三硝水溶液淬火后高硬冷轧辊中截面上组织分布

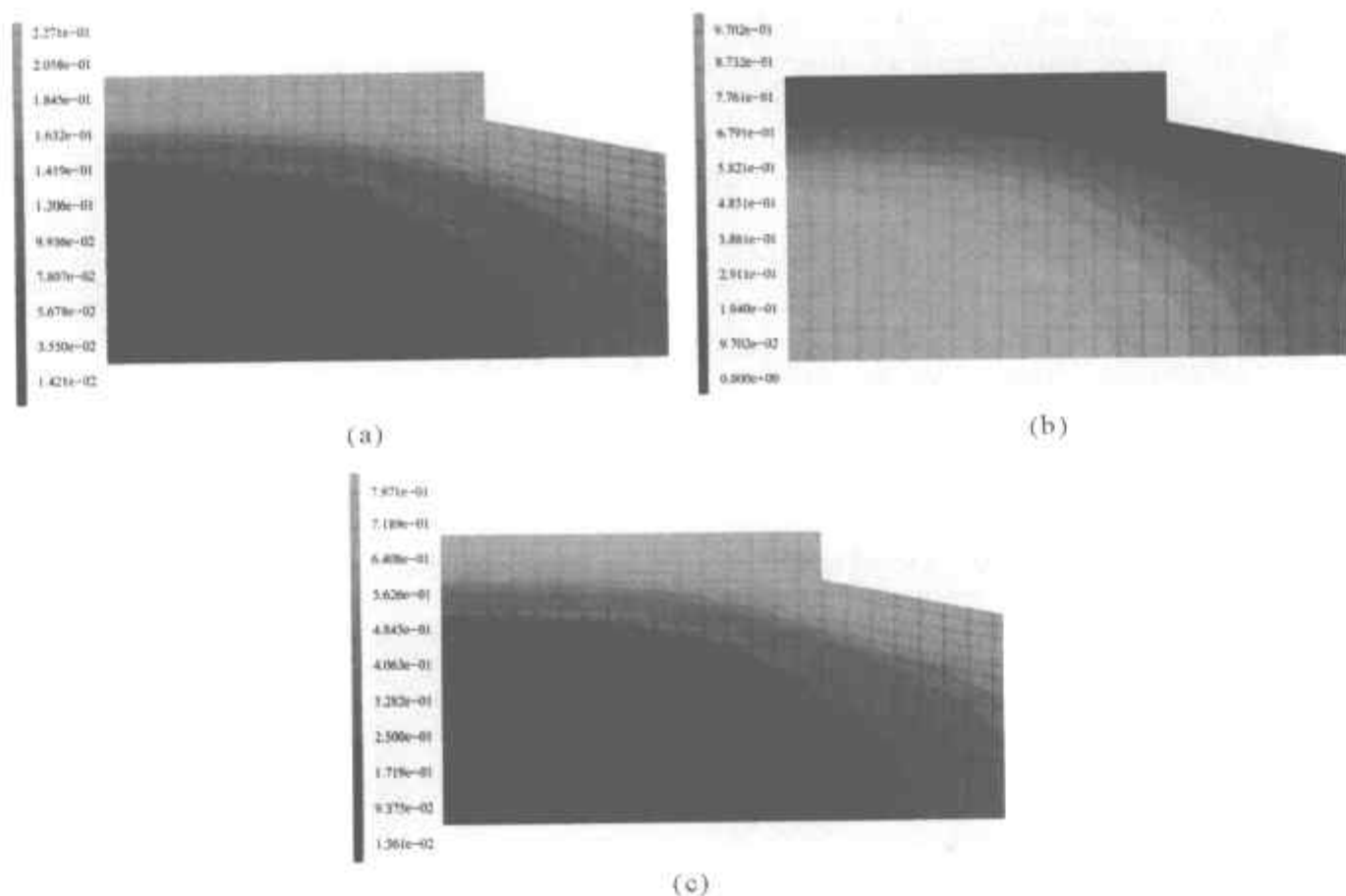


图 21 高硬冷轧辊中截面上组织分布云图  
(a) 马氏体; (b) 贝氏体; (c) 残余奥氏体

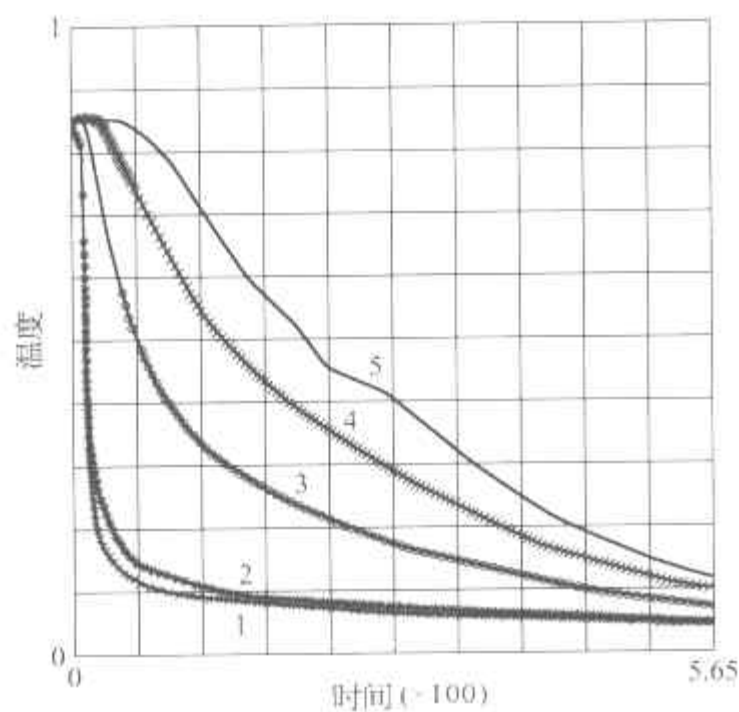


图 22 冷轧辊在三硝水溶液淬火过程中截面上不同点的冷却曲线

1—表面; 2—3/4 R; 3—1/2 R; 4—1/4 R; 5—中心

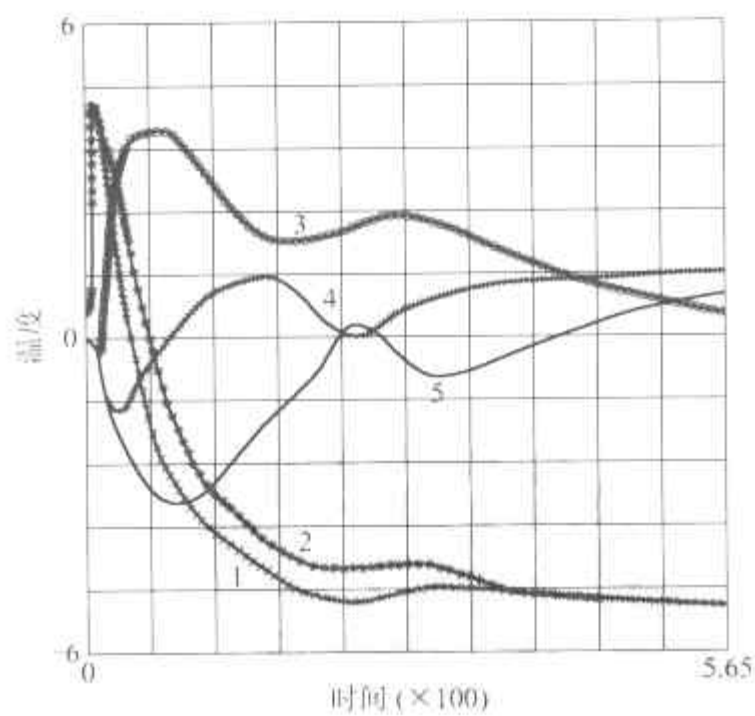


图 23 冷轧辊在三硝水溶液淬火过程中截面上不同点的应力变化

1—表面; 2—3/4 R; 3—1/2 R; 4—1/4 R; 5—中心

由图 23 可以看出在用三硝水溶液淬火冷却过程中内应力的变化,在淬火过程中应力没有超过强度极限,而且在淬火后在表面层和次表面形成压应力有利于提高轧辊的接触疲劳抗力(图 24,图 25)。

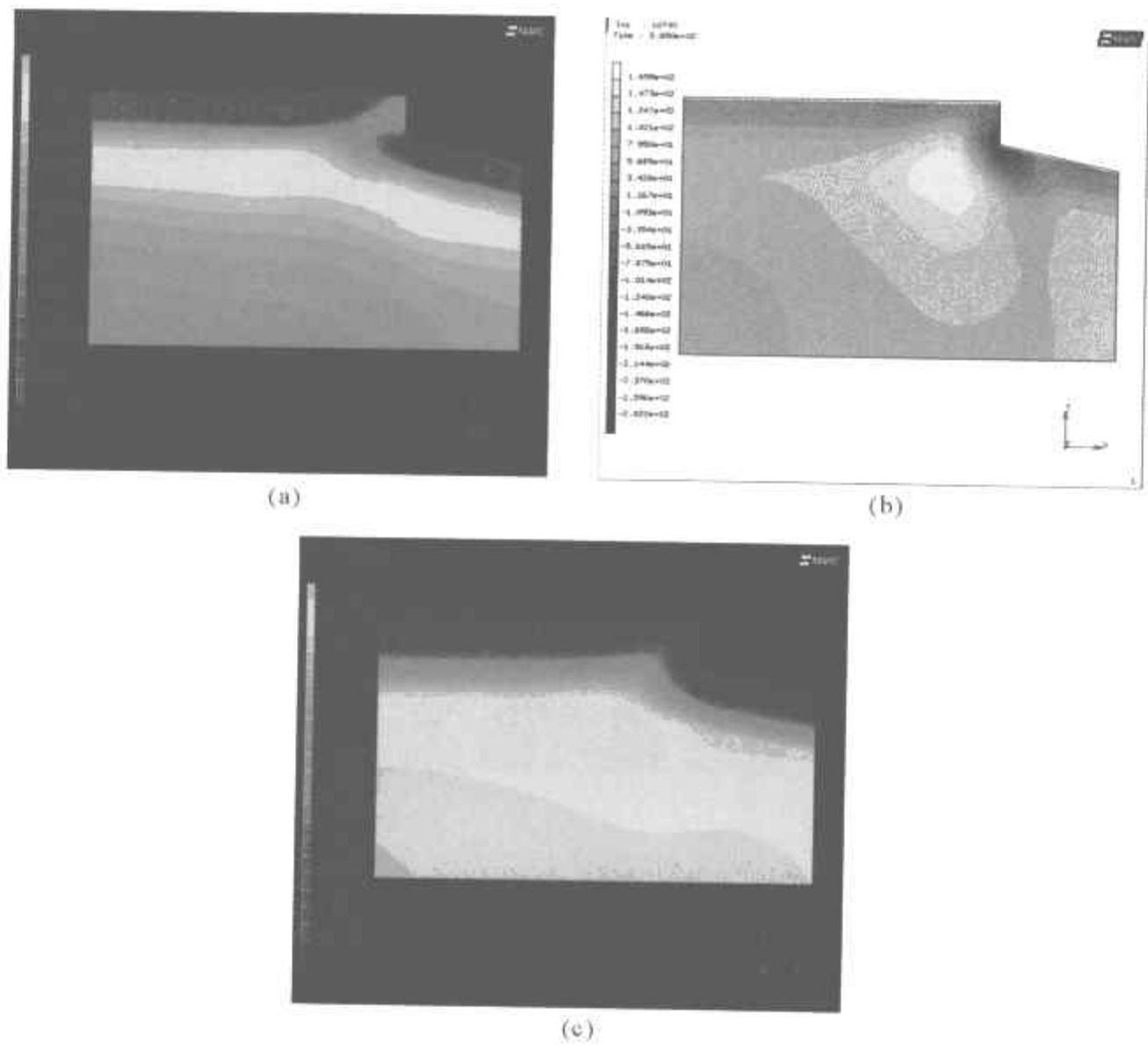


图 24 冷轧辊在三硝水溶液中淬火后残余应力场的云图  
(a) 轴向残余应力；(b) 径向残余应力；(c) 切向残余应力

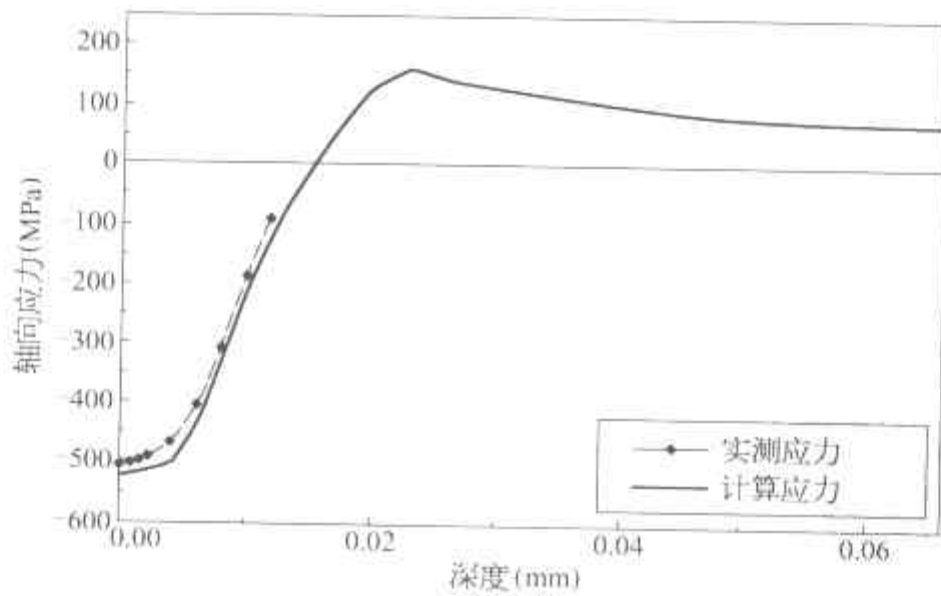


图 25 冷轧辊淬火后的应力的模拟结果与实测值的比较

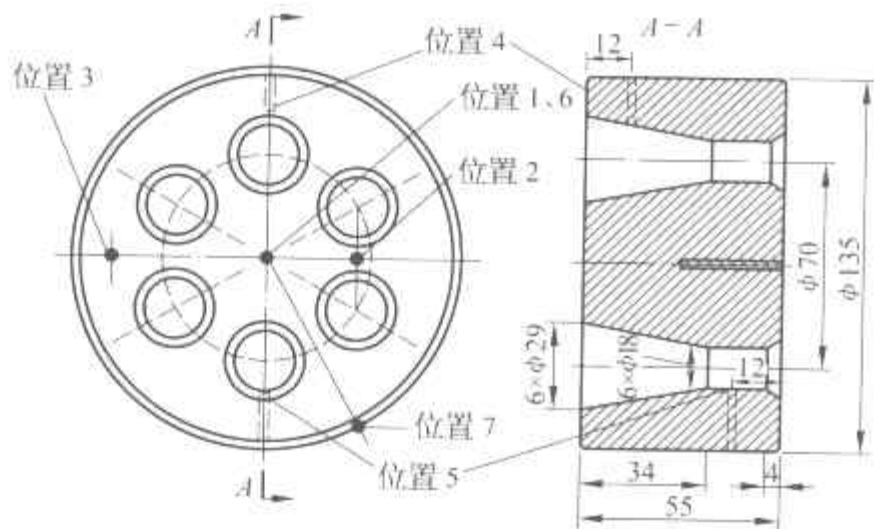
#### 4. 形状复杂零件淬火 CAE 的应用

应用温度场与相变耦合的模型进行淬火过程的计算机模拟,可作为选用冷却介质和制订淬火操作规程的依据。

45 钢制造的锚环(图 26),要求内孔有足够高的硬度,但要防止两孔之间距离很小处的淬裂。从不同的方



案中选出预冷→水淬→自回火的淬火工艺。锚环采用这一淬火工艺过程,不同位置上的冷却曲线的计算结果与实测结果基本相符(图 27)。淬火时马氏体转变过程的模拟结果见图 28。热处理后锚环内部组织分布的模拟结果也与解剖分析的结果基本符合。由 CAE/CAPP 所制订的淬火操作规程可以收到保证锚环的使用性能,防止淬火开裂以及用空气和水取代淬火油实现清洁生产等综合效益。



- 位置 1: 测温孔 1,  $\phi 2.5$ , 深 27.5mm。
- 位置 2: 测温孔 2,  $\phi 2.5$ , 深 53mm。
- 位置 3: 测温孔 3,  $\phi 2.5$ , 深 27.5mm。
- 位置 4: 测温孔 4,  $\phi 2.5$ , 孔内壁。
- 位置 5: 孔内壁。
- 位置 6: 锚环孔小口所在端面中心点。
- 位置 7: 侧表面中间点, 高度为 27.5mm。
- 位置 8: 锚环孔大口所在端面上两孔之间中间点。

图 26 锚环零件图

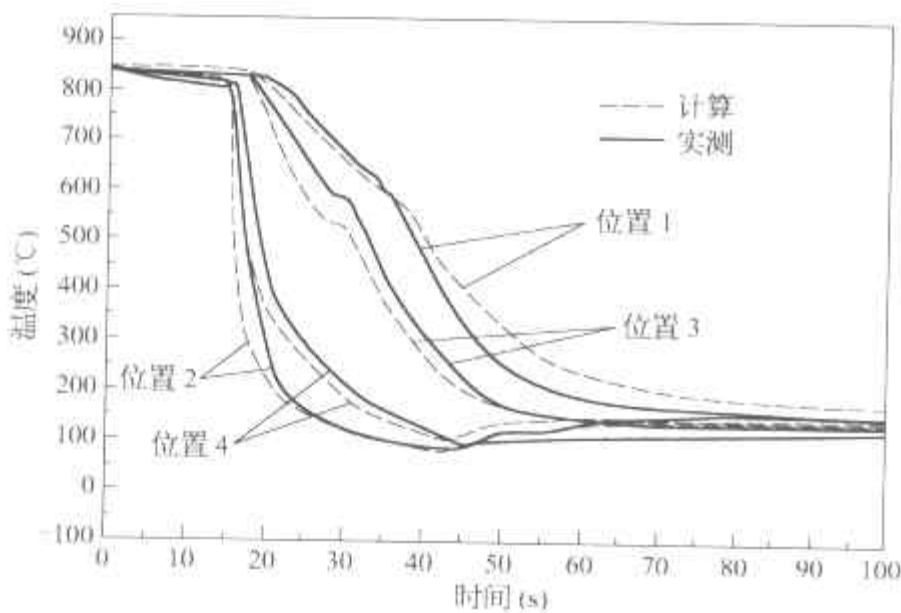


图 27 复杂淬火操作过程中(预冷→浸液→自回火)锚环内不同位置的冷却曲线模拟结果与实测曲线比较

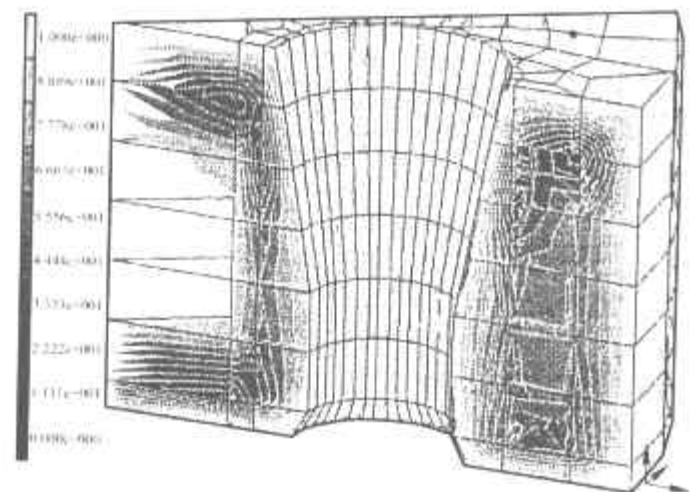


图 28 淬火时锚环内马氏体转变过程的模拟

另一实例是卡爪工件的淬火冷却。由于工件厚薄相差悬殊,其温度场十分复杂(图 29),淬火时很容易开裂,需要采用预冷→水淬→油冷或预冷→水淬→自回火等复杂的操作方法。同时因为相继进行的不同冷却阶段中,表面换热系数相差几个数量级,只有采用界面换热条件剧变的方法,才能较好地模拟卡爪的淬火冷却过程。模拟结果确定采用预冷 20 s→盐水冷却 6 s→出水自回火的淬火冷却方法,有效地防止了卡爪淬火开裂。正确预测淬火后的组织分布和性能分布(图 30 和图 31)。显微组织计算机模拟结果与定量金相分析实测结果基本相符(图 32)。

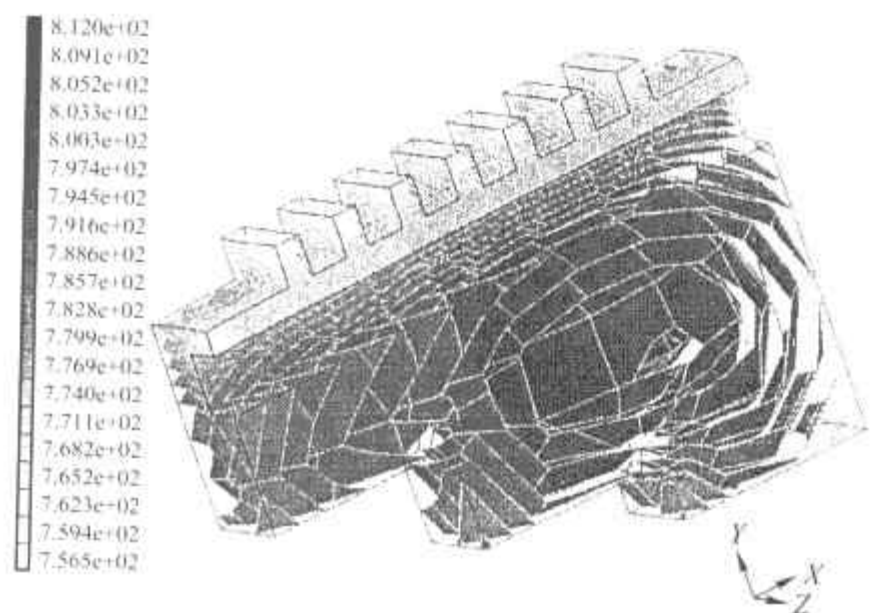


图 29 卡爪空气预冷 20 s 后的温度场



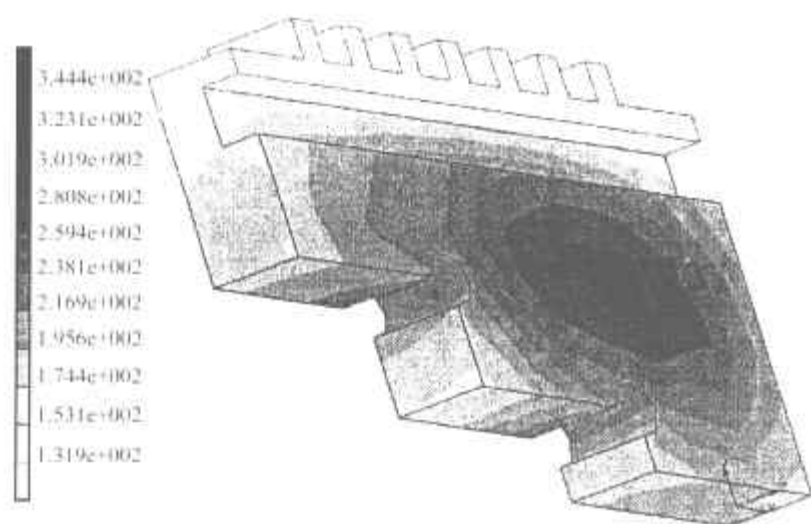


图 30 淬火后卡爪内马氏体量分布

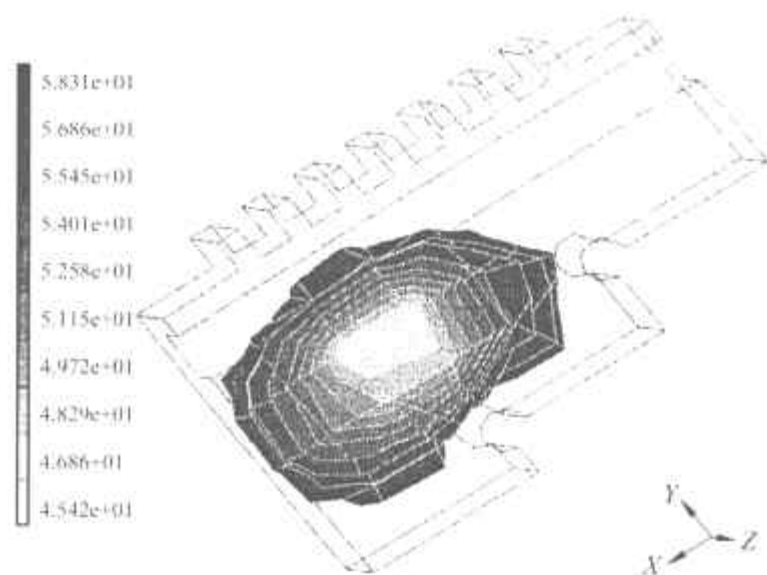


图 31 卡爪淬火后的硬度分布

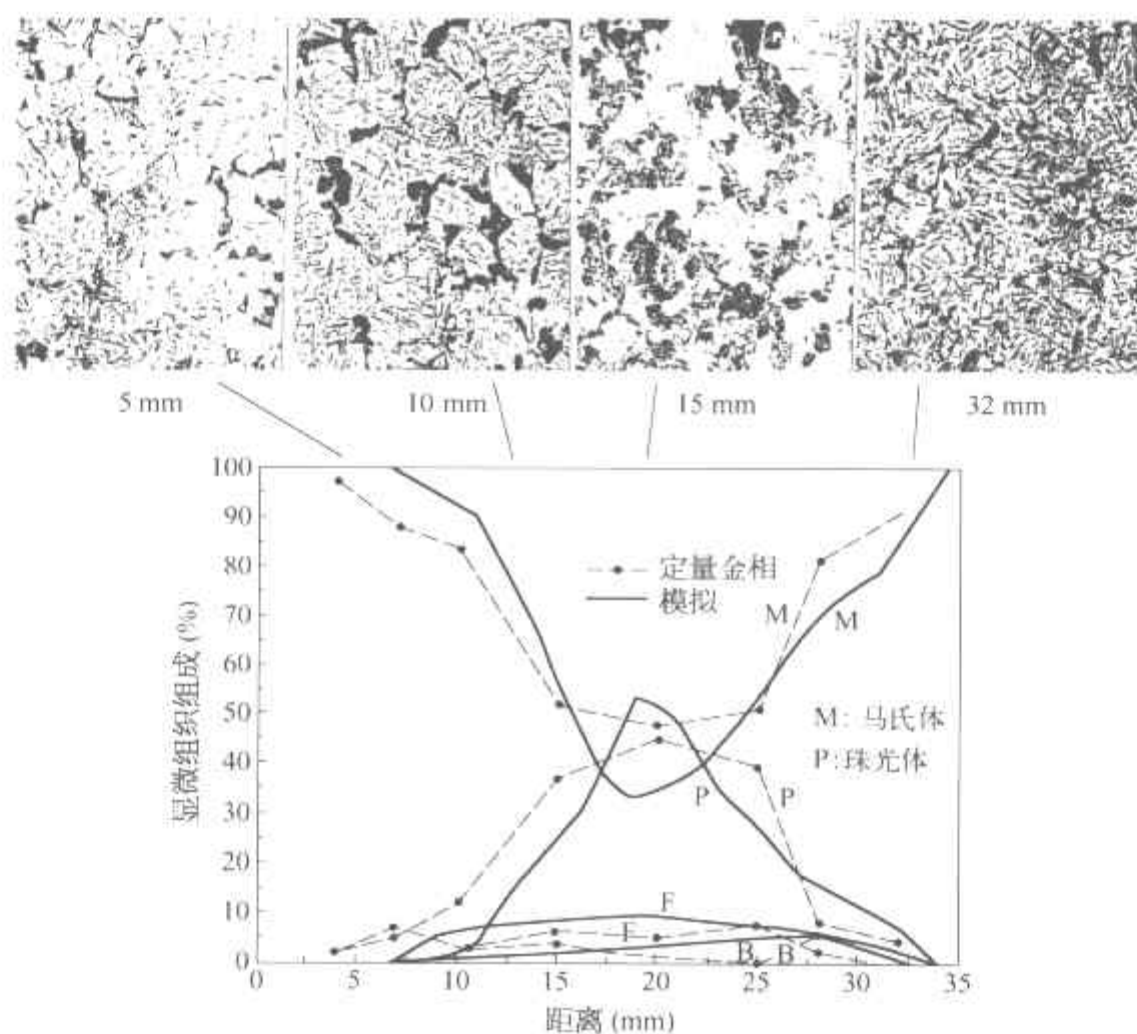


图 32 卡爪淬火后组织分布的计算机模拟结果与定量金相分析实测结果

### 5. 预硬型塑料模具钢大型模块淬火冷却虚拟生产的研究及应用

预硬型塑料模具钢 3Cr2Mo 和 3Cr2NiMnMo 的化学成分如表 4 所示。通常预硬化至 28~36HRC 出厂，由用户直接切削加工成型。它们的常规淬火工艺是油淬，3Cr2Mo 钢油淬的临界直径为 128 mm，3Cr2NiMnMo 钢油淬的临界直径为 234 mm。油淬时释放大量的油烟严重恶化生态环境，而且大型油槽还存在火灾隐患。为了改进大模块的淬火冷却方法，采用三维温度、相变耦合的模型。对其淬火冷却过程进行虚拟生产研究。

表 4 3Cr2Mo 和 3Cr2NiMnMo 的化学成分

(质量分数, %)

化学成分	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
3Cr2Mo	0.33	0.78	0.42	0.009	0.010	1.67	0.35	0.03	0.06
3Cr2NiMnMo	0.35	0.75	0.40	0.012	0.007	1.75	0.40	1.14	0.11

1) 3Cr2Mo 钢大型模块淬火虚拟生产研究 计算机模拟首先需要有准确的物性数据,为此,测定了 3Cr2Mo 钢的 TTT 曲线和 CCT 曲线,马氏体转变动力学曲线。采用反传热法测定了 25℃ 水 N32 机械油和聚合物水溶性淬火剂的换热系数与温度的关系。

3Cr2Mo 钢模块的最大尺寸为: 2 000 mm×1 500 mm×(150~500)mm, 重达 14~20 t。计算机模拟不同淬火工艺下冷却时的温度场和相变场, 得出如下结论:

(1) 从不同尺寸 3Cr2Mo 钢模块水淬后的组织分布可以确定, 采用这种方法生产的 3Cr2Mo 钢大模块最大的适宜厚度为 280 mm, 考虑到模拟可能存在误差, 建议 3Cr2Mo 钢大模块合适的使用厚度为 250 mm 以下。

(2) 图 33 和图 34 的模拟结果表明: 对于厚度为 250 mm 的 3Cr2Mo 钢模块, 采用 N32 淬火油淬火后只有棱边和棱角处出现马氏体, 模块心部存在珠光体, 影响整个模块硬度分布的均匀性; 采用 12% Ferroquenchant 有机溶剂淬火和直接水淬后, 模块表层转变成一薄层马氏体, 心部全部为贝氏体, 回火后有望达到 3Cr2Mo 钢预硬化处理硬度的要求。考虑到有机溶剂淬火剂价格昂贵且易老化, 水应该作为大模块的淬火介质的首选。

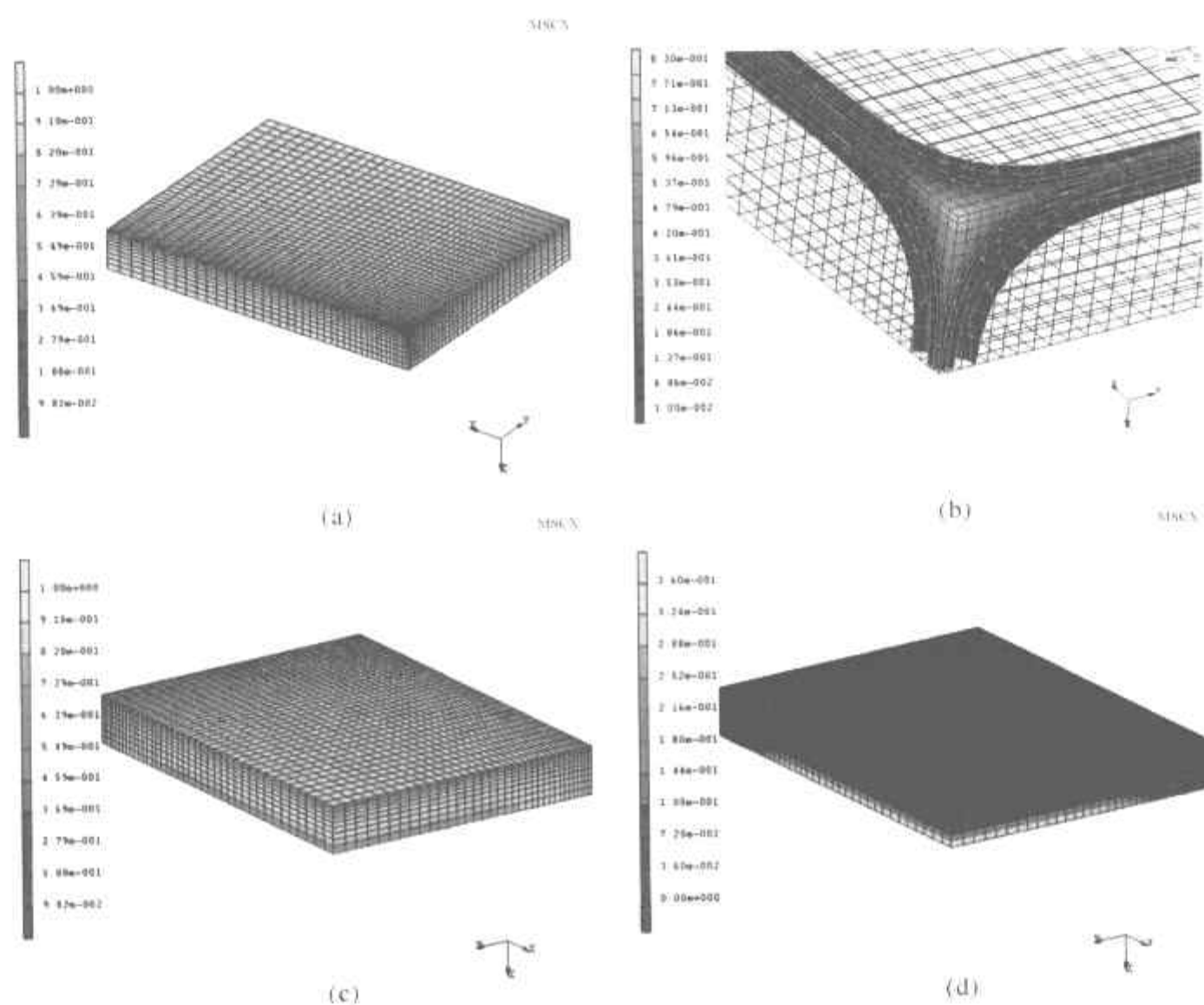


图 33 3Cr2Mo 钢模块采用 N32 淬火油淬火后的组织分布

(a) 马氏体云图; (b) 棱角处的马氏体; (c) 贝氏体云图; (d) 珠光体云图

(3) 3Cr2Mo 钢大模块直接水淬的组织分布可以达到 3Cr2Mo 钢预硬化处理硬度的要求, 但是由于棱角、棱边在淬火初期获得马氏体组织在随后长时间浸水过程可能引起裂纹, 见图 35。

(4) 图 36 和图 37 的模拟结果表明, 3Cr2Mo 钢大型模块采用预冷→水淬→自回火→水淬→空冷工艺淬火, 在棱角、棱边获得珠光体, 避免形成裂纹, 而且这些部位不可能是塑料模的型腔, 不会影响模具的使用性能; 水淬后及时自回火可以有效降低表层新生马氏体的脆性, 进一步减小开裂的可能性。另外, 采用该工艺淬火后, 除了非工作部位之外, 模块上的组织均为马氏体、贝氏体。因此预冷→水淬→自回火→水淬→空冷工艺可以满足大型 3Cr2Mo 模块淬火处理的要求。在实际生产中应用, 能令客户满意。

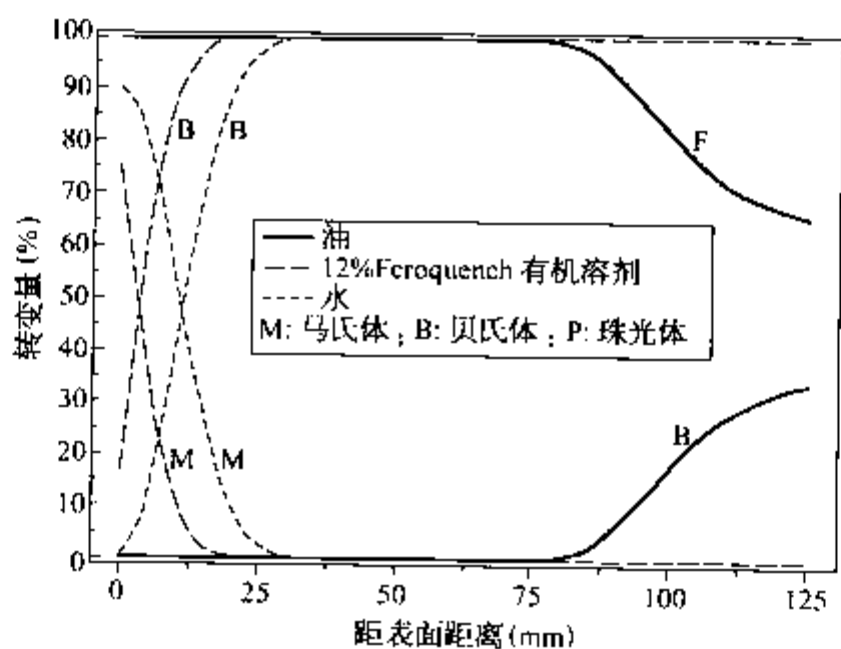


图 34 3Cr2Mo 钢模块采用不同介质淬火后中轴线上的组织分布

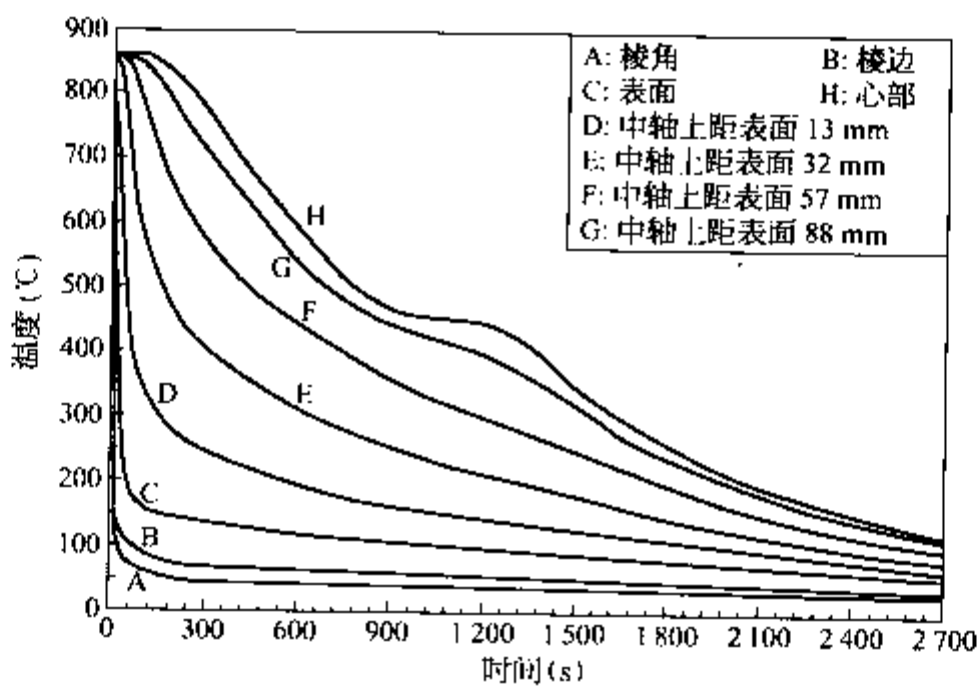


图 35 水淬过程中 3Cr2Mo 钢模块不同部位的冷却曲线

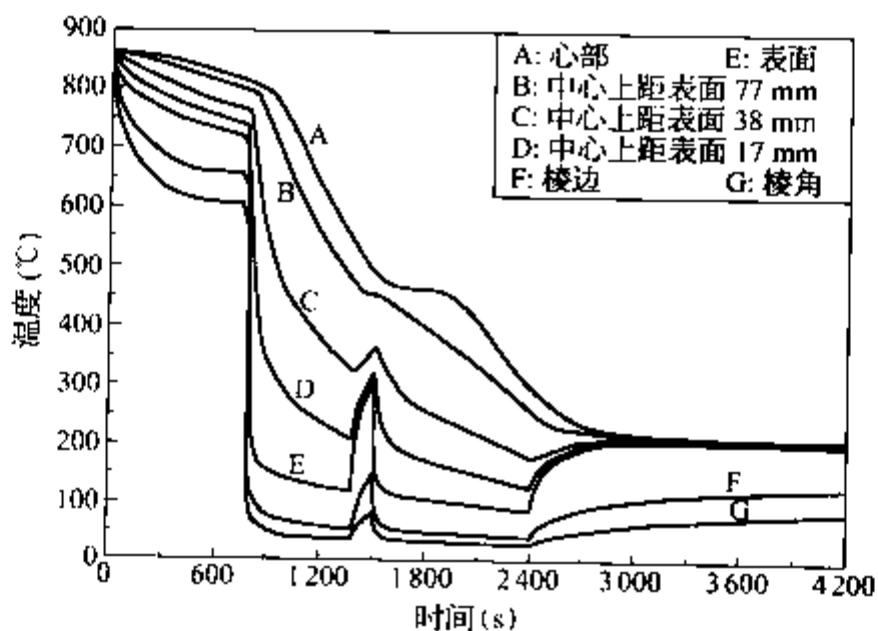


图 36 预冷→水淬→自回火→水淬→空冷工艺下 3Cr2Mo 模块不同部位的冷却曲线

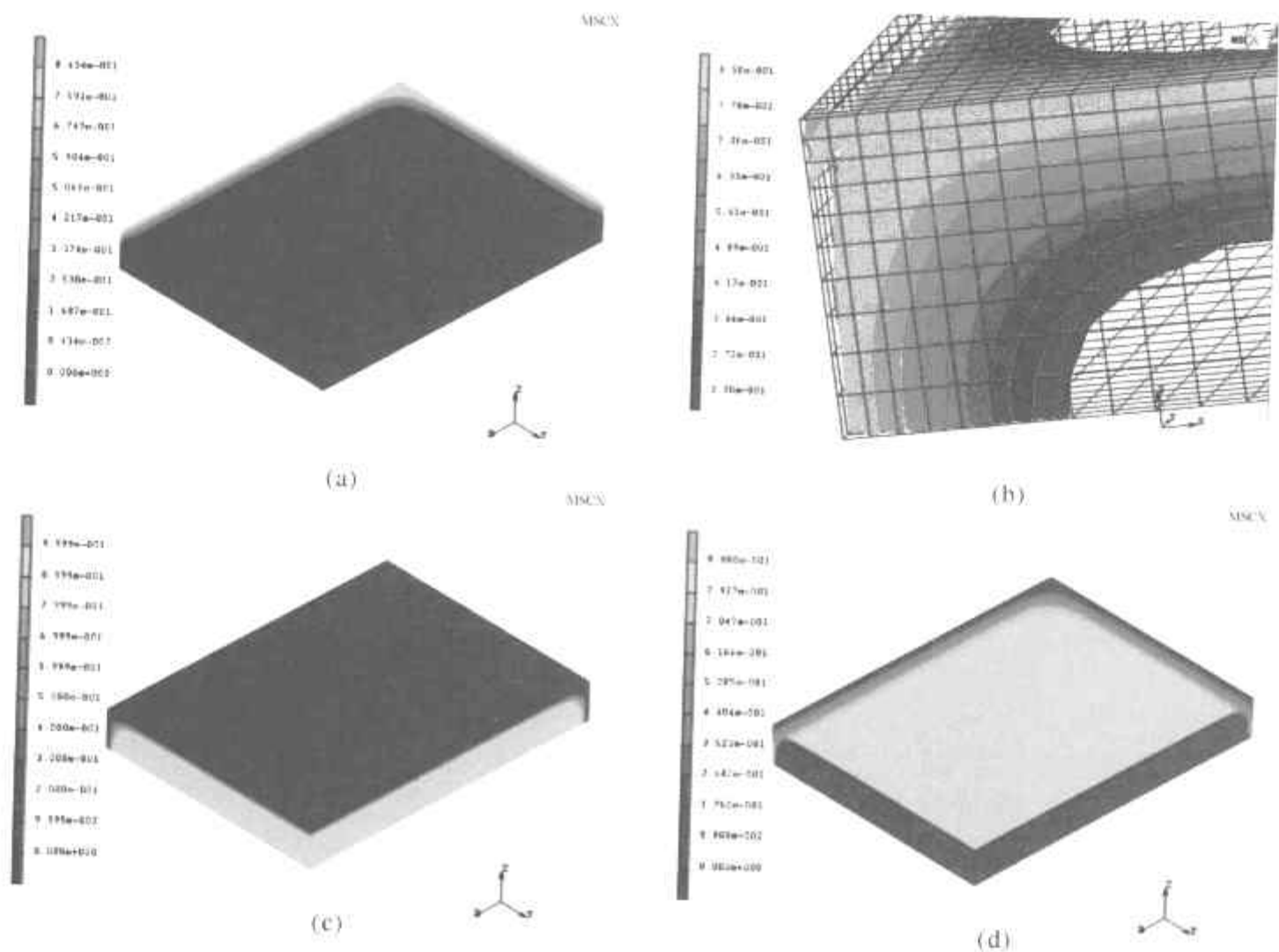


图 37 3Cr2Mo 大模块采用预冷→水淬→自回火→水淬→空冷工艺淬火后的组织分布

(a) 珠光体云图; (b) 棱角处珠光体; (c) 贝氏体云图; (d) 马氏体云图

(5) 现有文献中沿用的按淬透性曲线换算淬火临界厚度的传统方法是不合理的, 虚拟生产研究的结果合理地增大了 3Cr2Mo 钢适用的最大厚度, 达到 250~280 mm, 比传统方法所估计的“临界直径”增加了一倍, 有重大的潜在效益。

(6) 通过计算机虚拟生产, 可以直观地显示各种淬火工艺冷却过程中, 工件不同部位的温度、组织的变化, 预测可能出现的结果。计算机虚拟生产能以很高的效率确定优化的工艺方案。

2) 3Cr2NiMnMo 钢大型模块淬火工艺的虚拟生产 计算机模拟的结果表明大型 3Cr2NiMnMo 钢模块于 860℃ 奥氏体化后, 直接浸水淬火, 模块表层约 25mm 内获得马氏体组织, 水淬初期棱角、棱边相变得到马氏体在随后长时间的水冷过程中很容易萌发淬火裂纹; 860℃ 奥氏体化后, 直接空冷淬火, 模块心部为珠光体/铁素体组织, 难以达到硬度均匀分布的要求。

奥氏体化温度提高到 930℃, 3Cr2NiMnMo 钢的 TTT 曲线发生了显著的变化, 珠光体/铁素体相变最不稳定区的孕育期由 70 s 延长到 2 800 s, 而贝氏体相变最不稳定区的孕育期则从 8 s 延长至 30 s, 而且在 400~450℃ 的温度范围曲线趋于平台状。

利用 3Cr2NiMnMo 钢 TTT 曲线的这种特点, 用虚拟生产的方法提出了一种以空气和水为介质的脉冲喷水淬火方法冷却新技术, 图 38 是 2 000 mm×1 500 mm×500 mm 3Cr2NiMnMo 大模块脉冲喷水淬火不同位置上的冷却曲线, 图 39 是图 38 的局部放大。这种淬火冷却的方法特点是在出炉后经过 15 min 的预冷, 使棱角上的温度降低到约 500℃, 棱边上的温度降低至 600℃, 但过冷奥氏体并未分解。随即进行短时间喷水冷却, 使棱角和棱边冷却到马氏体点以下, 但模块表面则仍然在 Ms 点之上(图 38)。当棱边温度降低至 120℃ 时停止喷水, 由于热量由内向外传递, 使棱角、棱边和表面温度回升, 这将会使棱角、棱边上已形成的马氏体及时回火, 同时降低脆性和防止开裂。而这时模块表面温度仍处于过冷奥氏体状态。待表面温度回升至约 600℃ 时再次短时喷水, 并在棱边温度再次下降至 100℃ 时停喷, 使棱角和棱边再次自回火。此后通过合理调节喷水与停喷时间, 使工件表面温度在 3Cr2NiMnMo 钢过冷奥氏体最稳定的温度范围内上、下摆动, 模块内部各点的温度不断



下降,在喷水间隙期间模块表面温度回升渐趋缓慢,直至在停喷状态下表面温度不会回升到  $500^{\circ}\text{C}$ ,即可将工件置于空气中继续冷却。在整个脉冲喷射过程中,棱角、棱边多次自回火,避免了淬裂,而工件表面在 TTT 曲线的最稳定温度区间内保持过冷奥氏体状态,工件内部则以比空冷和油冷更快的速度冷却,抑制了铁素体与珠光体转变,最终使大模块整个截面上全部得到贝氏体组织,构成了一种不用等温槽实现贝氏体淬火的发明专利。

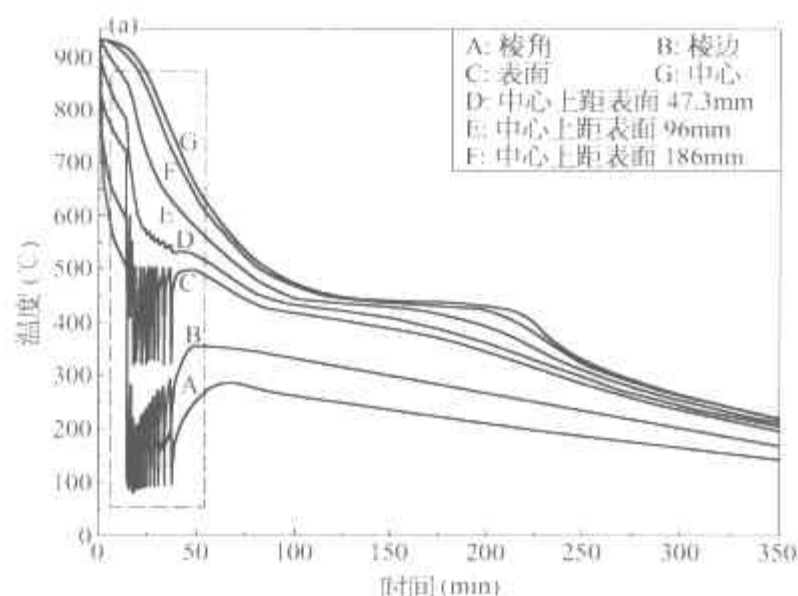


图 38 脉冲喷水淬火  $3\text{Cr}2\text{NiMnMo}$  钢模块不同位置上冷却曲线

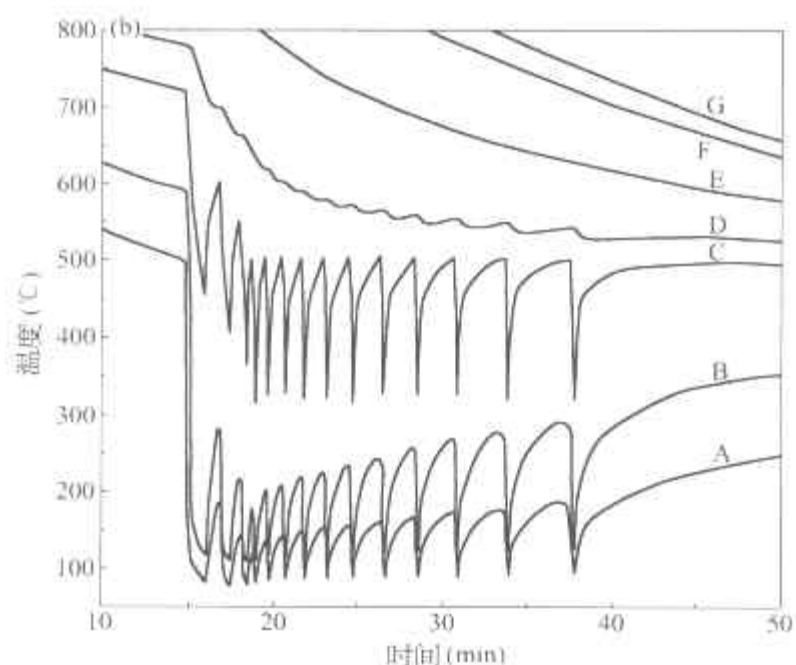


图 39  $3\text{Cr}2\text{NiMnMo}$  钢模块脉冲喷水淬火不同位置上冷却曲线(图 38 虚线框的局部放大)

3) 智能淬火设备的研制及其取得的效果 根据虚拟生产的结果,制成了大型智能淬火冷却设备,如图 40 所示,该设备通过计算机控制,输入虚拟生产确定的参数,自动完成大模块的淬火操作。目前该设备已经在抚顺特殊公司投产应用,已生产的  $3\text{Cr}2\text{NiMnMo}$  钢模块的最大厚度达  $710\text{ mm}$ ,检测符合质量要求。

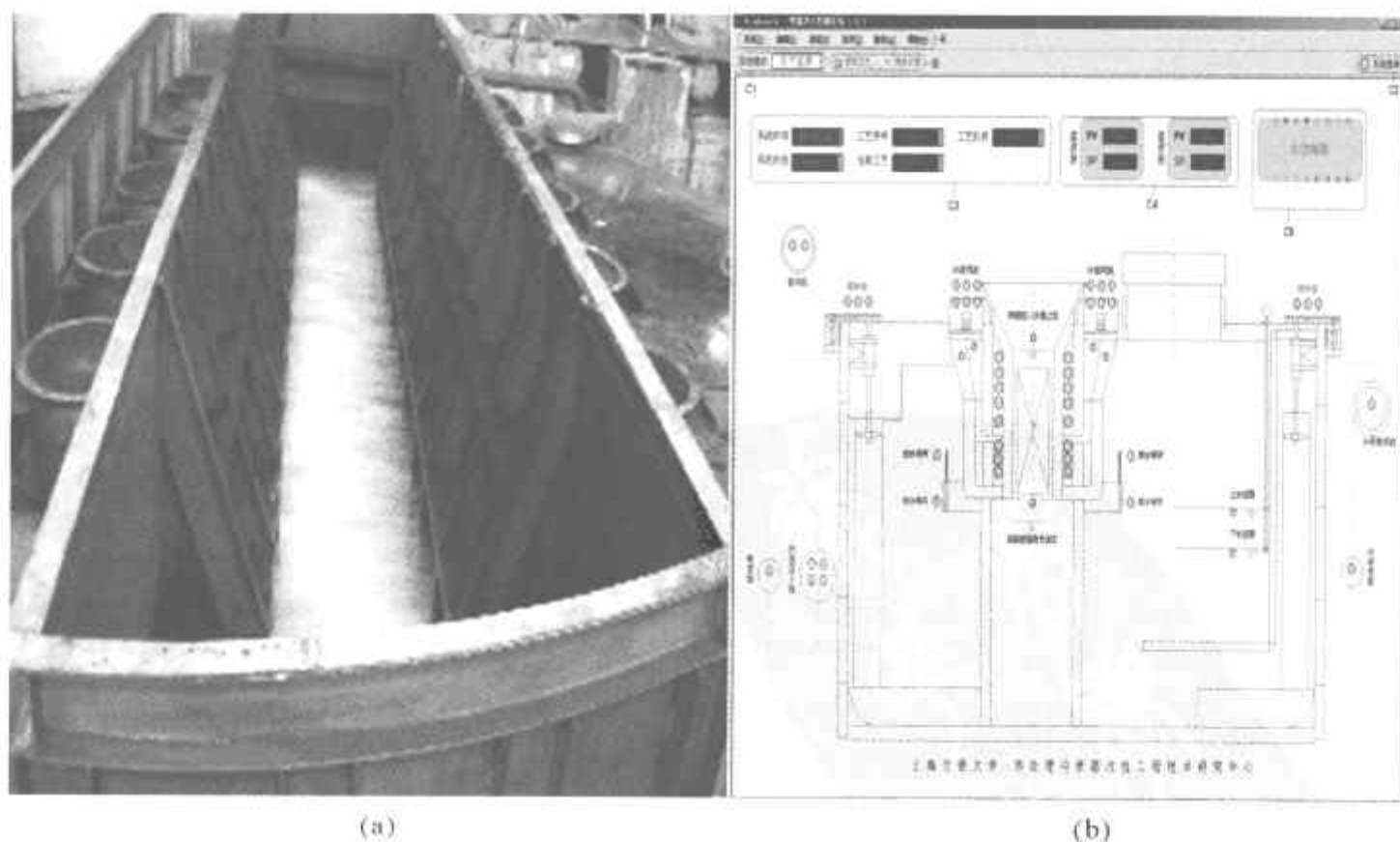


图 40 大型智能淬火冷却设备

(a) 淬火冷却设备; (b) 计算机控制系统的操作界面

图 40 所示的智能淬火设备采用了如下专利:合金钢大件水淬分层自回火工艺(发明专利:02136831.7);

清洁的等温淬火或分级淬火的方法(发明专利: 02136713. 2);浸液与喷淬组合淬火的控制冷却设备(发明专利: 200310123799. 5);塑料模具钢的贝氏体淬火方法(发明专利: 200410017025. 9);通过液面上升和下降进行淬火操作的淬火槽(发明专利: 200410084737. 2)。

应用虚拟生产方法开发成功的大型塑料模具钢采用智能淬火工艺与设备成套技术取得了如下效果:

(1) 消除油和有机溶剂淬火对环境的污染,根除了油淬的火灾危险,实现清洁、安全生产;

(2) 避免了水淬的淬火裂纹,提高了截面上组织与硬度均匀性,实现优质生产;

(3) 扩大了塑料模具钢应用的范围,3Cr2Mo 钢模块的厚度从 150 mm 增至 450 mm,3Cr2NiMnMo 钢模块的厚度从 500 mm 增至 1 000 mm,减少了合金元素的消耗,物尽其用,而且大幅度降低成本;

(4) 实现自动操作,提高劳动生产率。

#### 6. 曲轴渗氮畸变控制 CAE

用 35CrMo 钢制造的大马力高速柴油机曲轴,总长 2.4 m,精加工后进行渗氮处理。造成渗氮畸变的主要原因是在渗氮温度下停留 50 h 而产生蠕变。采用计算机模拟对自重所造成的应力场与曲轴的装炉方式及支承点位置之间的关系进行分析(图 41),从而预测曲轴渗氮后的畸变(图 42),为确定合理的装炉方法提供了依据。研究结果已应用于生产,曲轴渗氮后的弯曲畸变控制在 0.08 mm 之内,满足了技术指标的要求。

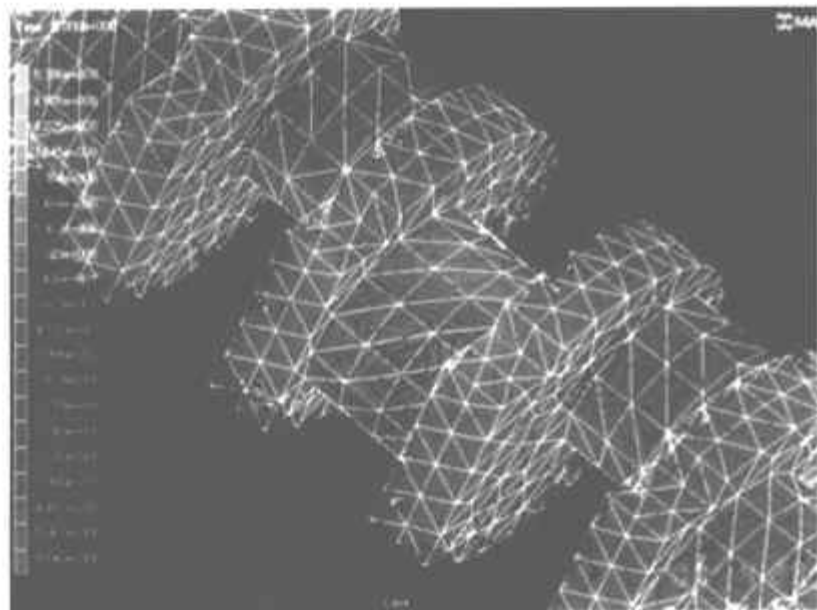


图 41 曲轴渗氮过程中由于自重引起的应力场

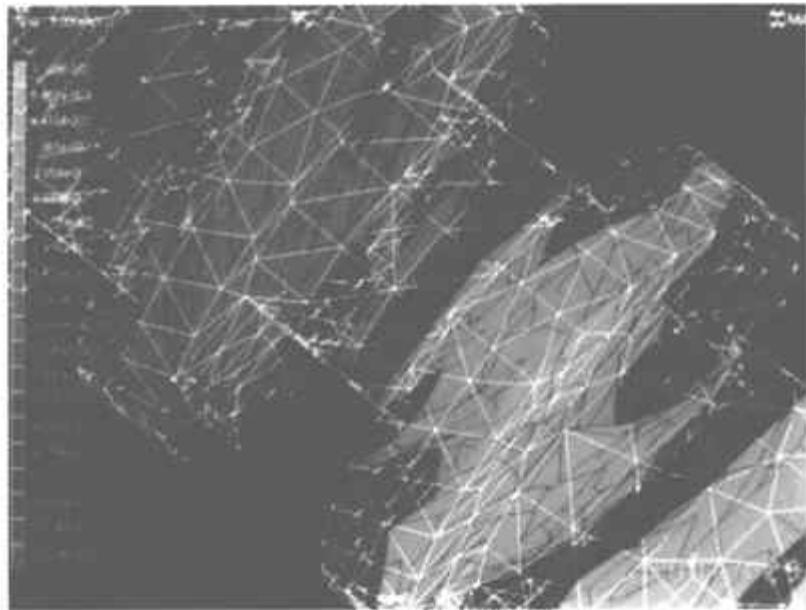


图 42 曲轴渗氮畸变的计算机模拟(等值面)

#### 7. 气体渗碳 CAE/CAPP/CAM

应用计算机模拟方法,针对零件的使用要求对渗碳过程进行分析,在此基础上优选气体渗碳工艺流程。

图 43 中的曲线 1 是齿轮获得最大承载能力的渗碳层浓度分布曲线。为了获得这种带有平台(或微凸型)的浓度分布曲线必须准确掌握开始降碳势的时间。如果过早降低碳势(即扩散阶段时间过长)将得到下凹型的浓度分布,使次表层强度下降。反之如果过迟降低碳势则次表层的碳浓度偏高,渗层脆性增大。这两种情况都降低齿轮的承载能力。例如高速重载变速箱齿轮(4 600 kW, 6 000 r/min)采用传统的“二段式渗碳”工艺,凭经验决定开始降碳势的时间,很难保证获得理想的浓度分布。以至于多次发生齿面接触疲劳、断齿,甚至齿轮碎块砸破箱体飞出的严重事故(图 44)。

为了提高重载高速齿轮的可靠性,进行渗碳过程计算机模拟。考虑到扩散阶段的碳势降低速度和降温速度都影响渗碳层浓度分布的变化,因此采用非线性瞬态浓度场数学模型针对该厂所采用的渗碳设备的具体工况进行模拟。用虚拟生产方法研究开始降碳势的时间对渗层浓度分布曲线的影响。从而确定恰好获得微凸型的渗碳层浓度分布的工艺,如图 43 所示。其中曲线 2 是温度变化曲线,曲线 3 是气相碳势分布曲线,曲线 4 是工件表面含碳量随时间变化曲线。将基于计算机模拟的气体渗碳 CAD 软件与工艺过程实时控制软件相结合,实现了无纸化生产。采用这种气体渗碳自动化智能控制技术之后,提高了齿轮的承载能力和可靠性,已大批量装机投放市场。十几年以来再也没有发生过高速重载齿轮损坏事故。

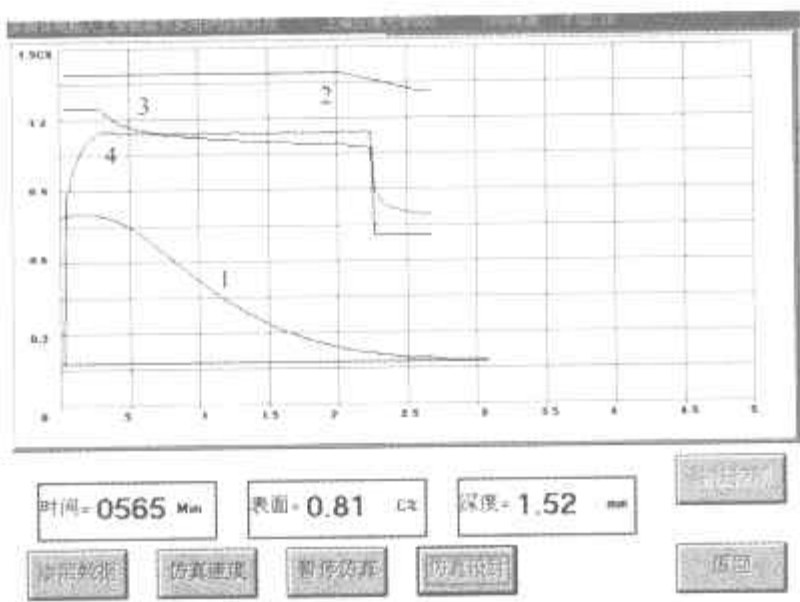


图 43 计算机控制系统自动进行渗碳过程模拟和优化工艺编制

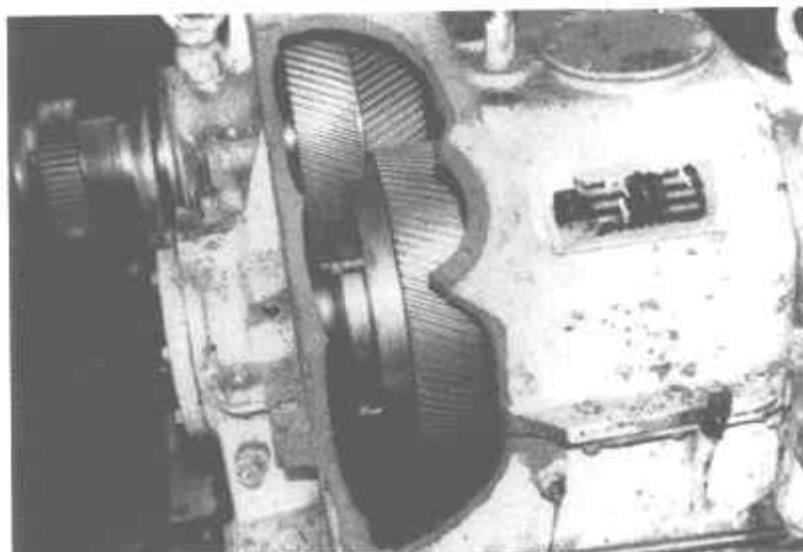
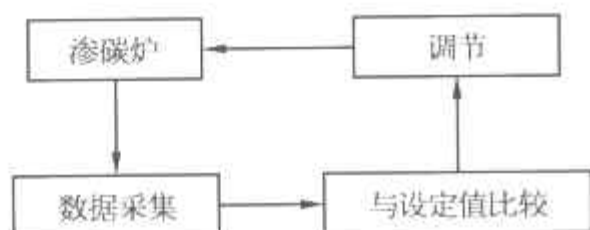
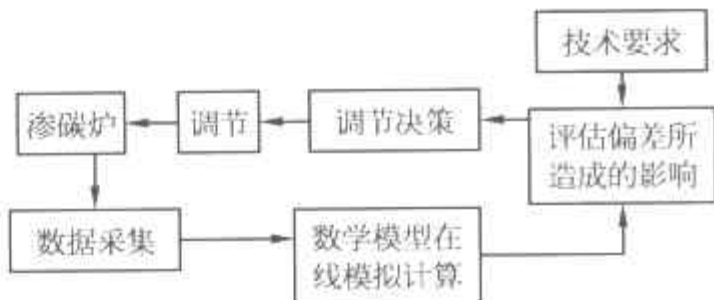


图 44 用传统工艺处理的变速箱运行时损坏

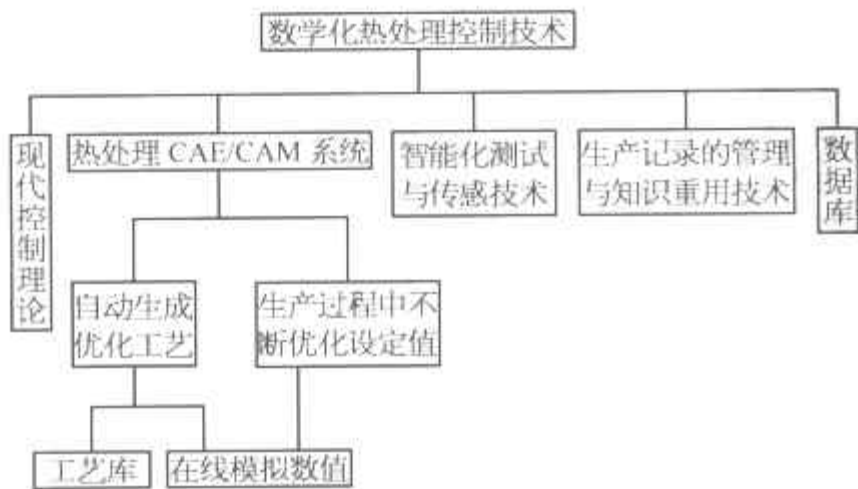
从图 43 的曲线可以看出,基于计算机模拟所确定于气体渗碳工艺与一般的“强渗—扩散二段式”工艺的一个不同点在于,在渗碳的初期可以采用更高的碳势使表面碳浓度迅速提高,当表面碳浓度达到奥氏体饱和浓度之后,气相碳势按下式逐步下降,使工件表面碳浓度保持不变,并等于奥氏体饱和碳浓度。从而使渗层中保持尽可能大的浓度梯度,加快了碳向内扩散,缩短了渗碳时间,称为气体渗碳动态控制技术。先后在几十家工厂推广应用。



(a)



(b)



(c)

图 45 传统的碳势控制技术(a)与动态碳势控制技术(b)的比较及数字化热处理控制系统示意框图(c)

$$C_x = C_{\text{饱}} + \frac{D}{\beta} \left| \frac{\partial C}{\partial n} \right|$$

式中  $C_x$ ——气相碳势的控制值;

$C_{\text{饱}}$ ——该温度下奥氏体饱和碳浓度;

$D$ ——碳的扩散系数;

$\beta$ ——碳的传递系数;

$\frac{\partial C}{\partial n}$ ——法向方向碳的浓度梯度。

将计算机模拟软件与实时控制软件融合在一起,开发成功自动消除偏差影响的智能控制技术,称动态碳势控制技术。相应的原理框图见图 45。

气体渗碳和气体渗氮是以炉气的碳势或氮势作为调节控制的参数,还不可能实时测量和调节工件表面的浓度和渗层浓度分布。碳势(或氮势,下同)本身就带有大滞后的特征,而且工件表面的浓度变化明显滞后于炉气的变化,渗层内浓度场的变化又明显滞后于表面浓度的变化。通用的自动控制技术只能自动消除碳势测量值与设定值的偏差(图 45)但不可能正确控制渗层浓度分布。采用数学模型在线模拟的动态碳势控制技术(图 45),并不是以消除碳势的偏差值为目标,而是实时计算出浓度分布曲线的实际变化,作出纠正偏差所造成的影响的决策,从而实现渗层浓度分布曲线的正确控制,保证气体渗碳



质量的重现性。

图 46 是一个气体渗碳智能 CAM 系统自动消除偶然因素造成的后果的例子,在(a)时刻之前处于正常的控制状态,在(b)时刻出现渗碳剂供给中断的故障,炉气碳势缓慢下降,并使渗层表面发生脱碳。但在深度 > 0.25 mm 以上的渗层中,碳继续向内扩散,当渗碳剂供给系统的故障消除之后碳势回升(b)。及至(c)时刻,气

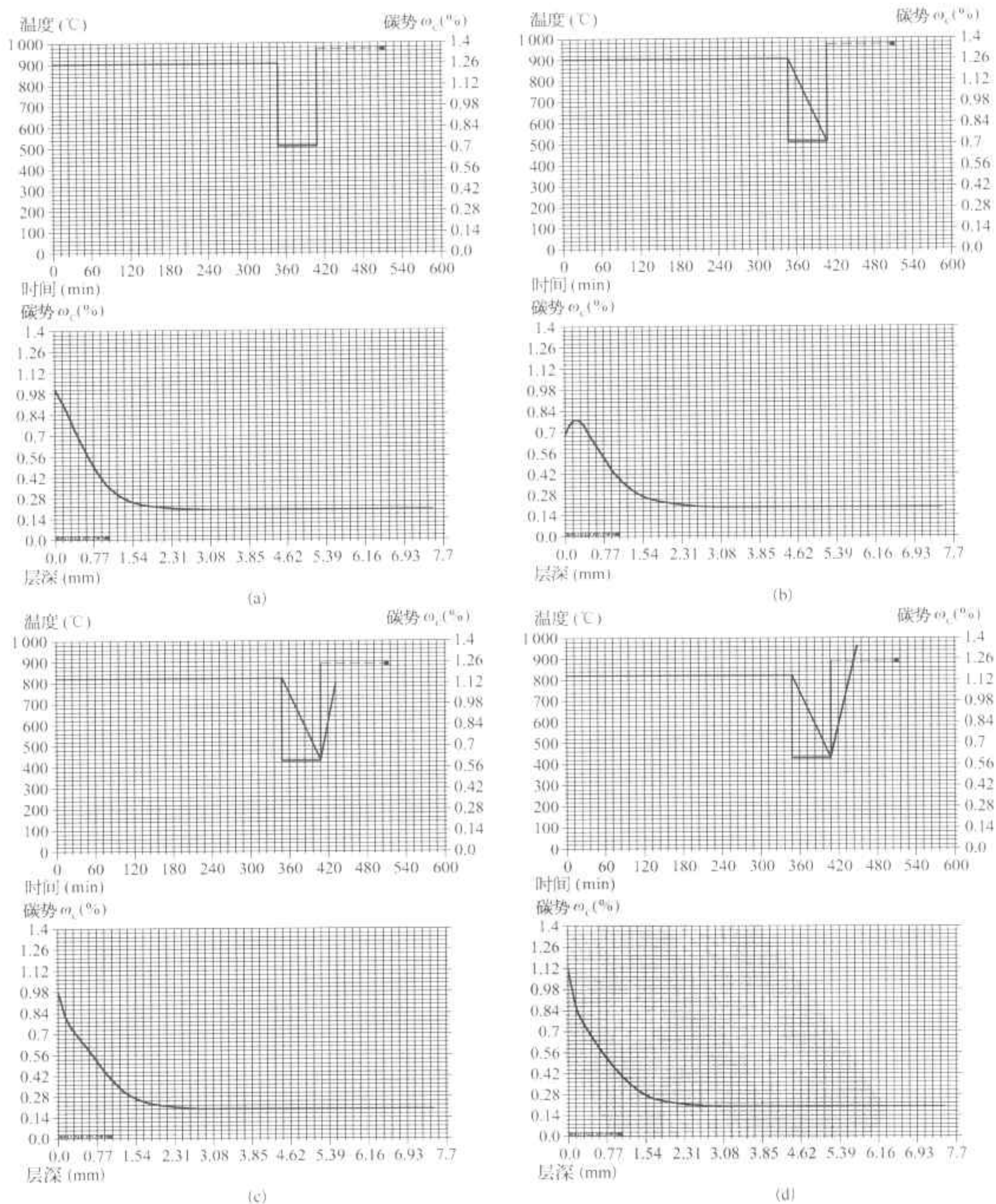


图 46 气体渗碳 CAM 技术自动消除偏差所引起的后果



相碳势已回复到原来的设定值。按通常的自动控制理念,在(c)时刻之后应使气相碳势保持在原有水平上继续运行。然而此时偏差虽被消除,偏差所造成的浓度曲线形状的改变仍未完全消除,因此计算机系统根据实时在线模拟结果作出判断,此时表面含碳量 $\omega_c$ 只恢复到0.98%,低于奥氏体饱和浓度。于是智能控制系统令气相碳势继续上升,使表面含碳量尽快提高。在(d)时刻表面碳含量恢复到奥氏体饱和浓度。此后令气相碳势逐步下降,使每一时刻工件表面吸收的碳流量恰好等于由工件表面向内扩散的碳流量。这就可以在控制表面含碳量不变(而不是气相碳势不变)的情况下使得碳以尽可能快的速度向内扩散。用这种方法,由计算机自动补偿偏差对渗碳后果的影响,保证渗碳质量的重现性。

应用上述成果开发成功智能型密封箱式炉生产线,具有自动设计优化工艺,自动完成过程控制,自动消除偏差的影响,确保渗碳质量,缩短工艺时间等功能。首条生产线安装于浙江汽车齿轮箱厂,正常运行五年以上,处理齿轮约8000炉以上,质量全部合格,明显提高热处理质量,并且每炉渗碳时间由6.5h缩短到5.75h。商品化的智能密封箱式炉自动生产线已有定型产品投放市场。

#### 8. 基于计算机模拟的动态可控渗氮技术

气体渗氮是一种偏离平衡状态的过程,表面反应速度是制约气体渗氮过程的主要因素。传统的氮势定值控制或分段定值控制的渗氮方法,很难准确控制渗氮层的浓度和性能。如果为了降低渗氮层脆性而降低氮势的设定值,将会明显降低渗氮速度和有效硬化深度。反之若采用较高的氮势设定值,则因渗氮层脆性过大而影响工件使用效果。

应用计算机模拟技术可以设计合理的动态可控渗氮工艺,在初期采用尽可能高的氮势,使表面氮浓度迅速提高到 $\alpha$ -Fe的饱和浓度(图47)然后按下式令氮势由高到低连续变化

$$a_k = a^c + \frac{D}{\beta} \left| \frac{\partial C}{\partial n} \right|$$

式中  $a_k$ ——气相氮活度;

$a^c$ ——临界氮活度;

$D$ 和 $\beta$ ——氮的扩散系数和传递系数;

$\frac{\partial C}{\partial n}$ ——法向方向氮的浓度梯度。

使得在其后的整个渗氮过程中表面氮浓度始终保持在临界值(图47)从而达到正确控制渗层表面氮浓度,又可以保持尽可能高的渗氮速度。

动态可控渗氮技术明显提高了渗层的性能和工件使用寿命与可靠性,已在舰用大马力柴油机活塞销、缸套、齿轮及注塑机零件上推广应用,取得良好效果,例如船用双圆弧齿轮(图48)的负荷系数 $K$ 达到735MPa,比普通渗氮提高25%。

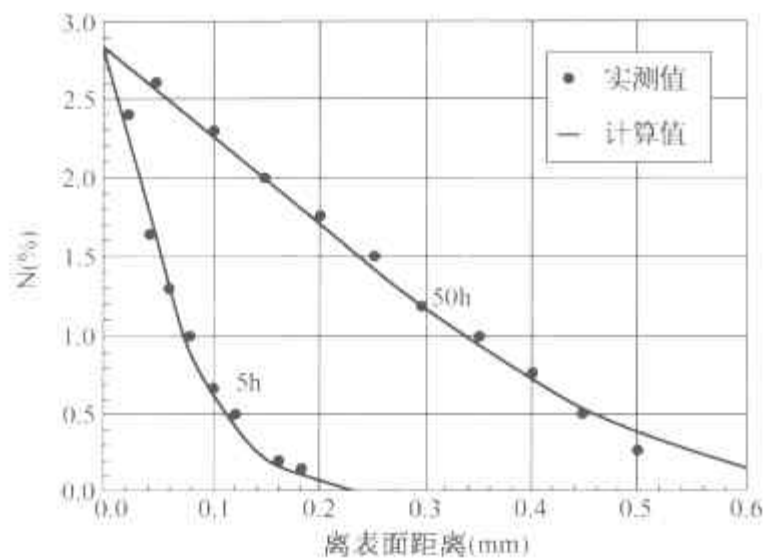


图47 38CrMoAl 510°C 动态可控渗氮的浓度分布曲线

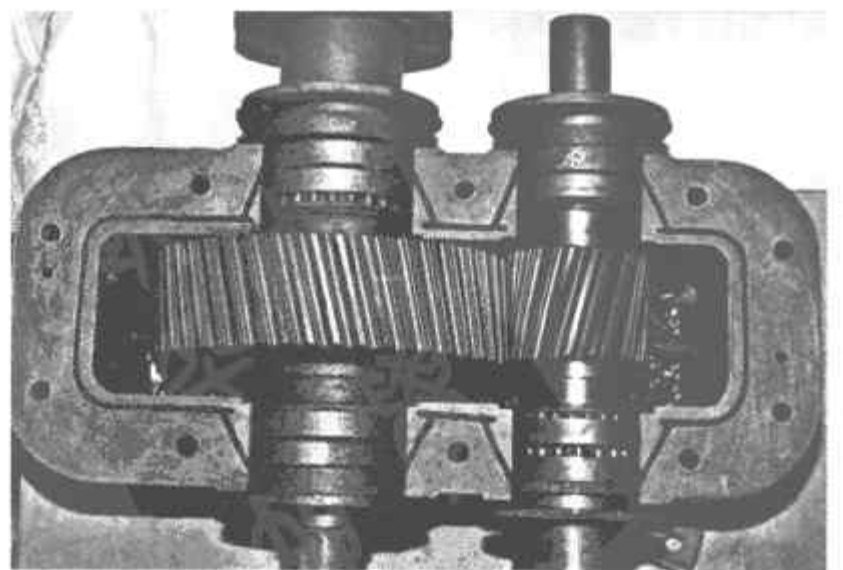


图48 动态可控渗氮处理的船用减速箱双圆弧齿轮

#### 9. 气体渗氮炉的流场模拟

为了使模拟结果趋近实际,将密封炉膛内风机叶轮对气流的驱动、各种炉内构件造成的流动阻力及其对速

度矢量的影响作为一个统一的问题进行处理具有一定的意义。图 49 是一台罩式渗氮炉炉罐内流速矢量图。炉内气体由炉罐底部的风机叶片驱动下,作强迫对流,如图 50 所示。炉内有一个导流桶。顶部是一个标准封头。图 51 反映出离心式风机驱动下,炉内气体流动的复杂情况在炉罐与导流筒之间气体旋转向上,在导流筒的内部旋转向下,速度矢量的切向分量相当大,这种流场的特点是现有热处理炉设计技术中未考虑到的现象,这种流动情况会对气氛均匀性和渗层深度的一致性造成重大影响。例如图 52 表明,在原设计的炉罐和导流筒结构,由于旋转气体使得中心区域的流速明显偏低,造成料筒内流动不均匀,用流场计算机模拟分析不同形状导流板的影响,得出一种在炉罐顶配置导流板的设计方案,明显改善炉内气流的均匀性,如图 53 所示。流场计算机模拟还可以用于研究炉罐内的每一个构件的形状也对流场影响。例如,将图 54 与图 55 作比较就可以看出:炉内直角形的搁板和放射状的搁板对流场的影响明显不同。

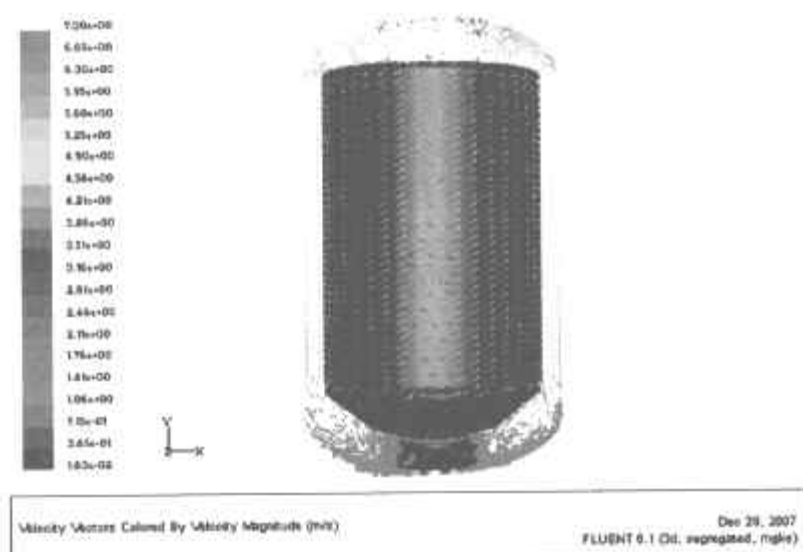


图 49 钟罩炉内速度矢量图

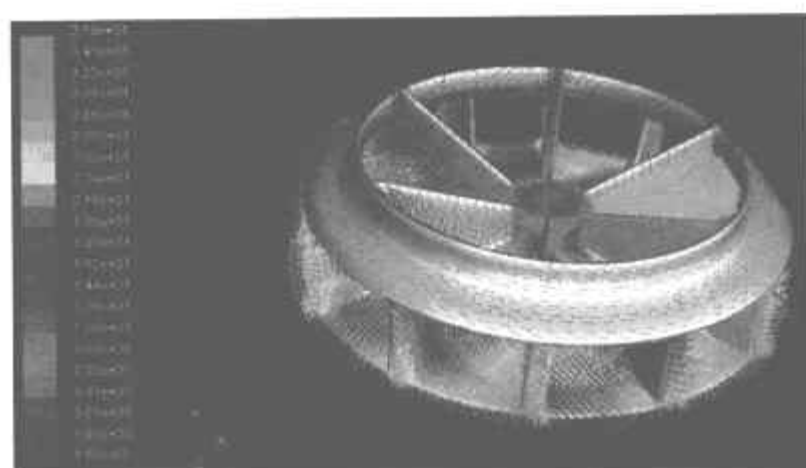


图 50 风机旋转驱动炉气强迫对流(风扇表面上气体的速度矢量图)

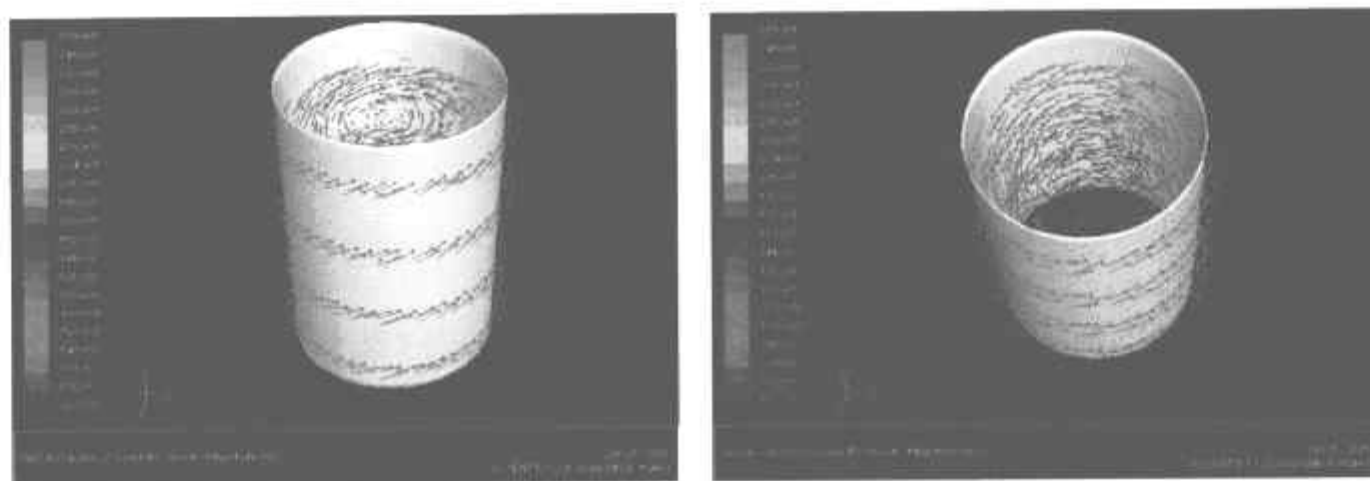


图 51 在离心式风机驱动下导流筒外侧与内部气流速度矢量图

用耦合传热的模型研究炉内流场与温度场的相互影响,能更准确反映炉内的温度分布,是热处理设备虚拟设计技术中另一重大进展。模拟结果还表明:用金属材料制造的支承法兰由于热导率远远高于炉衬耐火材料,所以法兰伸出炉外的部分仍处于比较高的温度,它所造成的热短路损失不容忽视。图 56 是用气—固耦合导热的模型计算的结果,反映出热短路对炉温分布的影响。

流场动力学模拟和耦合导热模拟相结合,能够更为全面地反映包括炉体、炉内构件、工件和流体在内的整体温度场(图 57),成为热处理设备虚拟设计的有用工具,通过选择合适的炉子结构,流场分布和发热体功能分布,改善炉内温度均匀性。将有利于提高渗氮零件质量的一致性。并可以扩大炉膛的利用率,实现节能。这一研究成果已被顺德世创集团所采用,新型渗氮炉样机已制造完成,装料区内最大温差的实测值为 7℃。上述结果可以说明流场数值模拟在热处理设备设计中的重要作用。计算机模拟可以克服传统的热处理炉设计的局限性,正确反映各种复杂的导热状况,有助于提高炉温均匀性,扩大炉内均温区(有效装料区)的范围,提高炉膛利用率,以及尽可能减少热短路损失,可望取得显著的节能效果。

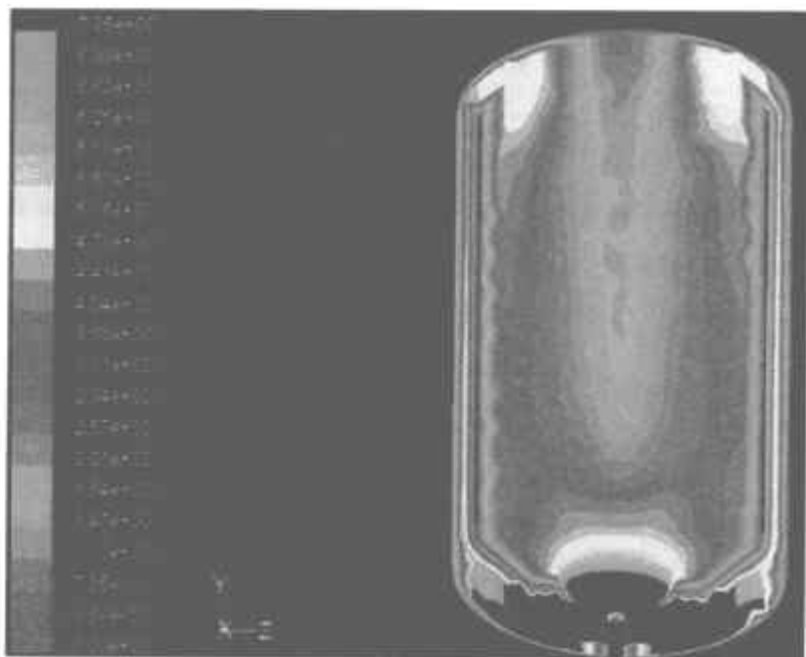


图 52 原始炉型流体速度云图

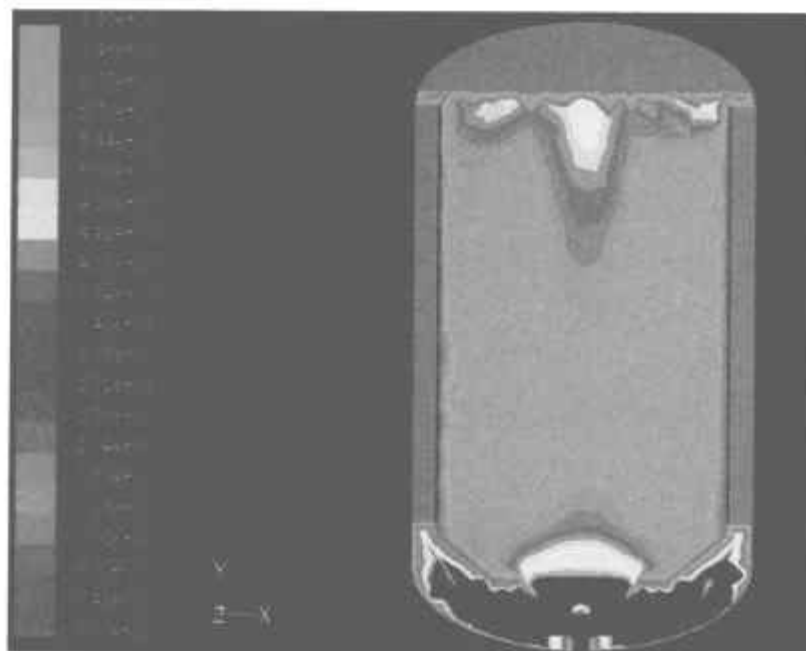


图 53 经过改进的渗氮炉流体速度云图

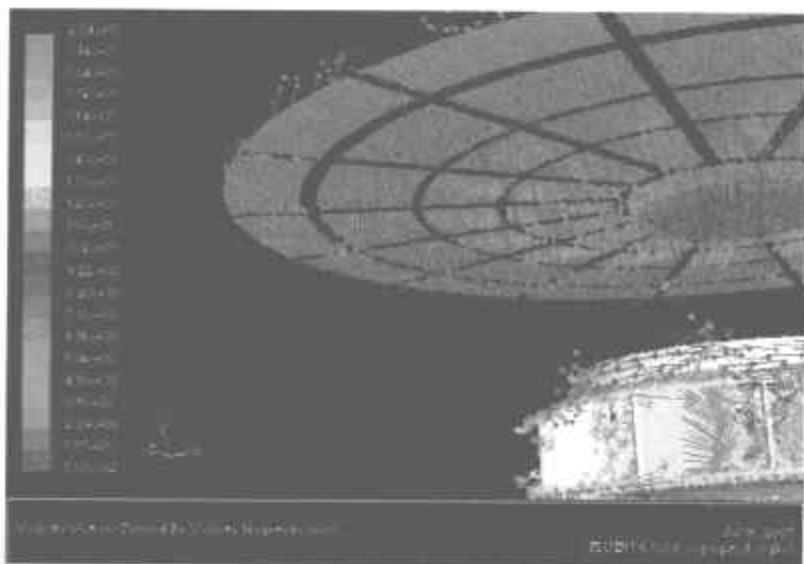


图 54 发射状搁板附近的流体速度矢量图

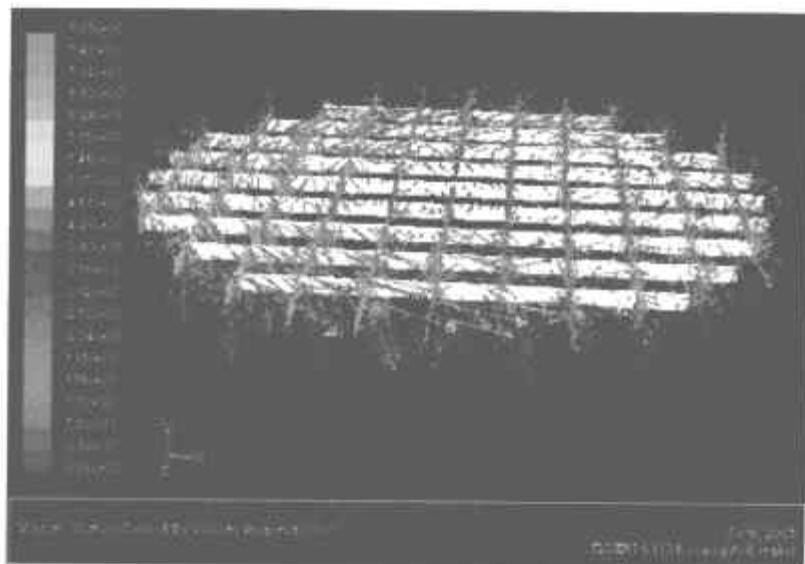


图 55 蜂窝状搁板处的流体速度矢量图

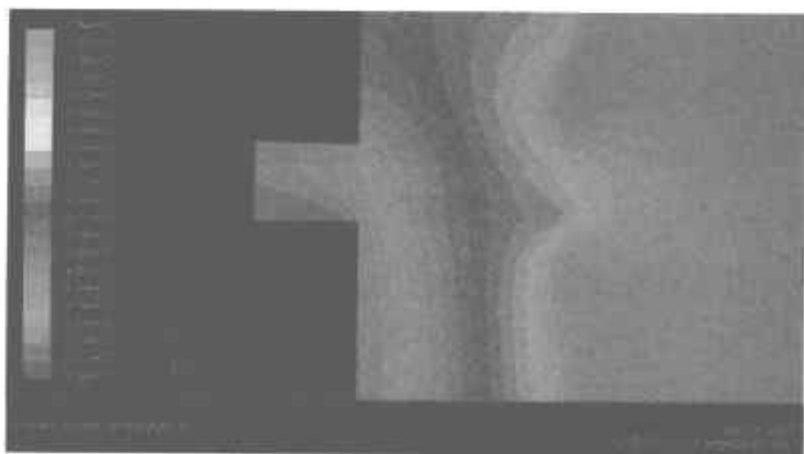


图 56 支承法兰对渗氮炉的温度场的影响

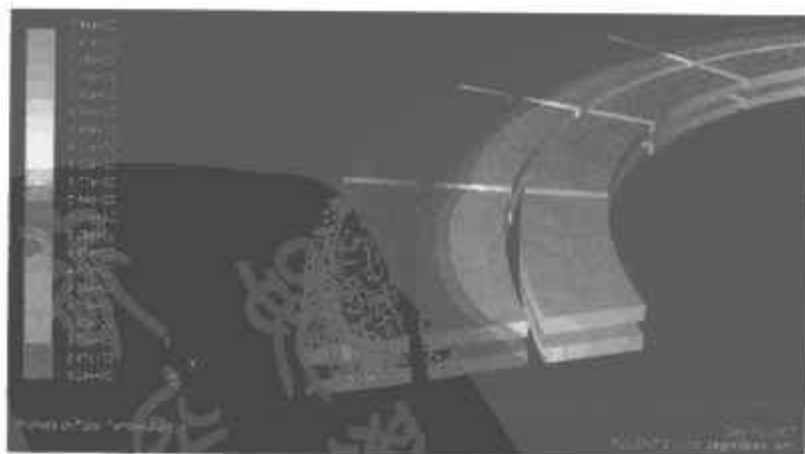


图 57 支承法兰的温度场云图

#### 10. 特大型气体渗碳炉的流场和温度场模拟

20 世纪末亚洲最大、世界罕见的特大型气体渗碳炉，其设计制造的难点是如何保证炉内气体流动的合理性和炉温均匀性，借助于流体力学模拟(图 58)和温度场模拟(图 59, 图 60)进行炉膛结构与炉衬的设计。该炉建成后一次调试投产成功，实测炉温均匀性优于国标中最高级别的规定，解决了大型水利枢纽升船机主变速箱齿轮和 300 t 拔管机变速箱齿轮制造等国家重点工程急需的问题。



图 58 特大型气体渗碳炉流体力学模拟

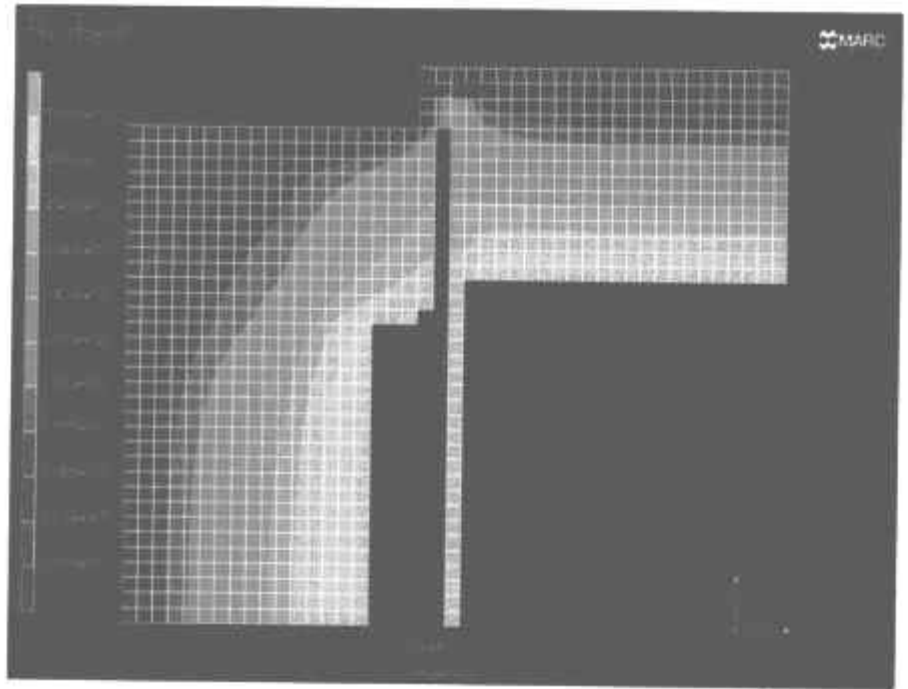


图 59 特大型气体渗碳炉炉衬温度分布的模拟(上区)

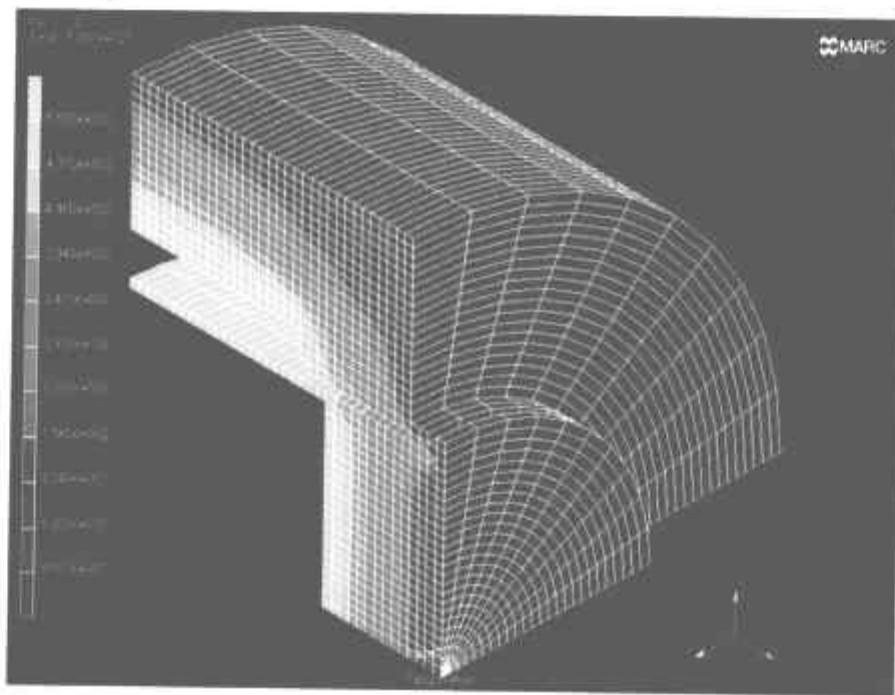


图 60 特大型气体渗碳炉炉衬温度分布的模拟(下区)

#### 四、计算机模拟在热处理上应用的前景

##### 1. 热处理虚拟生产和热处理设备的虚拟制造

应用计算机模拟使人们得以在虚拟现实的环境下以极高的效率了解不同的工艺和不同设备结构对热处理过程及其结果的影响,从中优化热处理工艺和设备设计。于是,计算机模拟平台就成为功能强大而高效的“生产试验基地”,使产品热处理虚拟生产和工艺装备的虚拟制造成为可能。

虚拟生产或虚拟制造与试验研究并非相互对立,而是紧密地相互依存。科学实验的特点是用抽象思维的方法制订能排除其他因素影响的试验方案,获得精确的测试数据,阐明各种现象本身的规律。而计算机模拟技术的优点是应用信息技术,从实测数据中繁衍大量信息,将个别现象的规律加以集成,描述实际生产过程不同现象之间的相互作用。因此计算机模拟使传统的试验方法的功能得到极大的扩展。计算机模拟则必须应用实测的试验数据,作为计算机模拟的依据,并且必须根据实测结果对模拟进行验证



或者对模型加以修正。计算机模拟和试验研究相辅相成,恰如两条腿走路,加快热处理技术进步的步伐(图 61、图 62)。

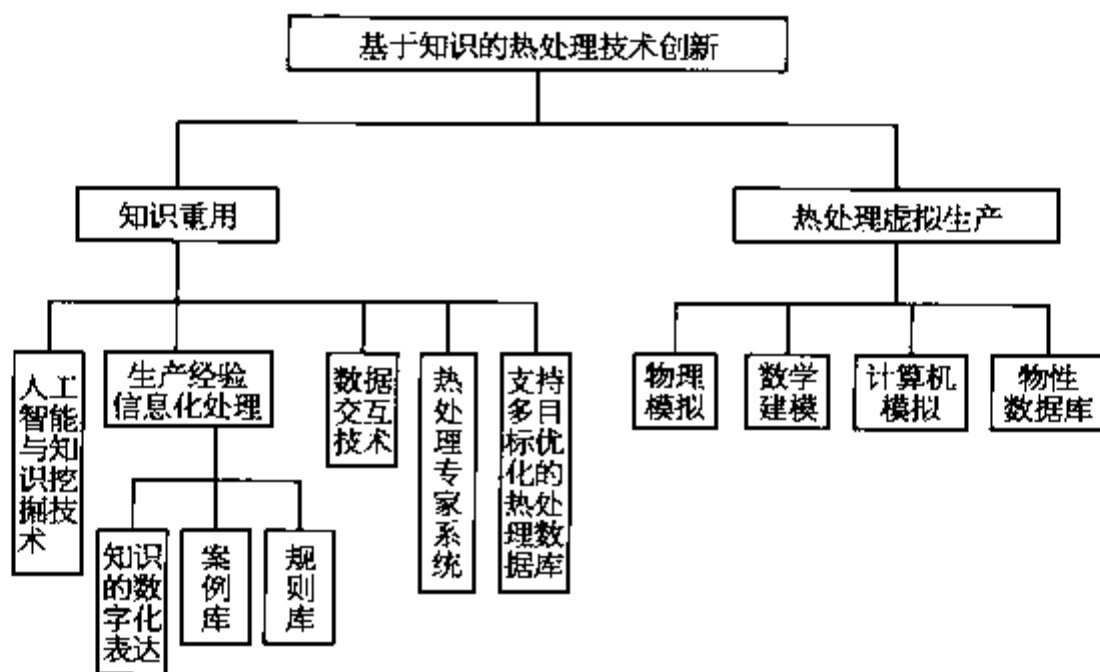


图 61 热处理 CAE/CAPP 系统

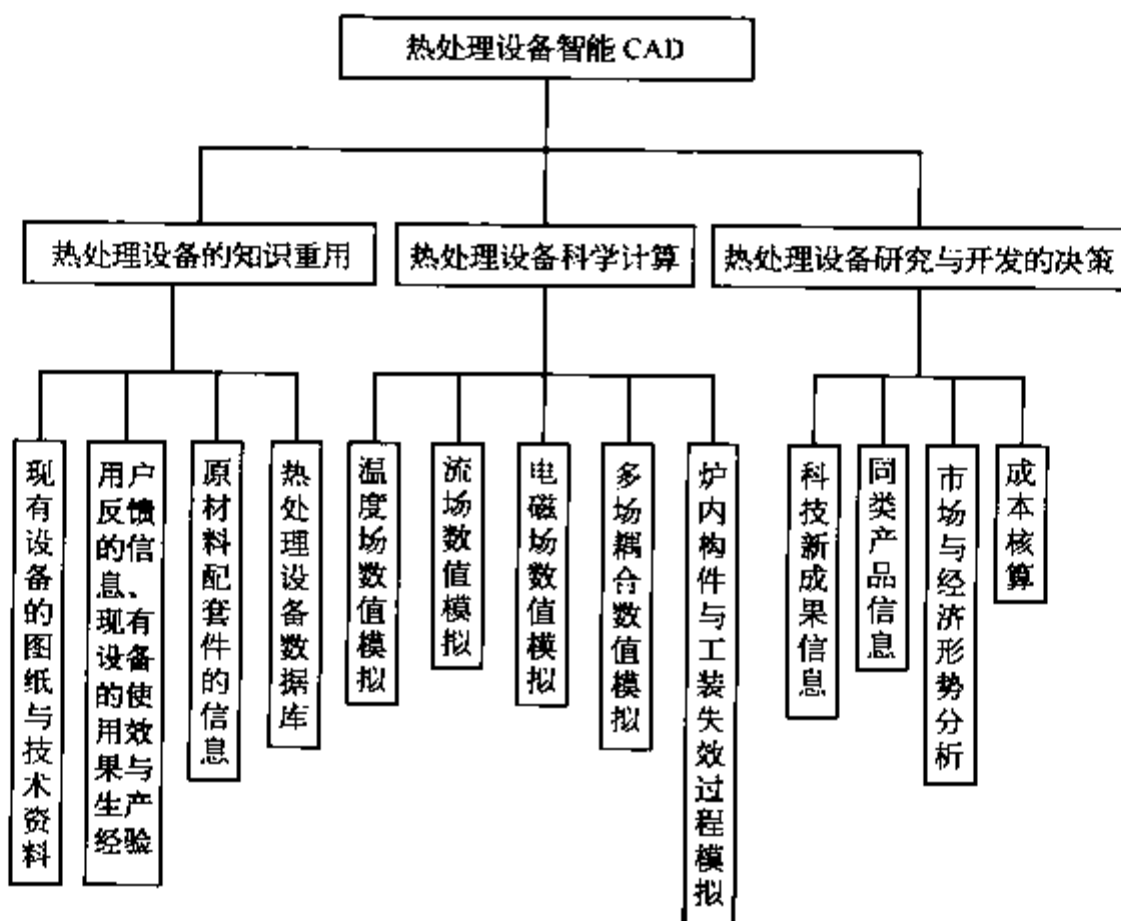


图 62 热处理设备 CAE/CAD 系统

## 2. 热处理计算机模拟与轻量化、高可靠产品的设计制造

信息化的集成制造和并行工程是先进制造技术的发展方向,可是热处理至今还未能融合于其中。热处理的工艺开发以及生产工艺的制订都和产品设计脱节,以致在产品的开发中不可能最大限度利用材料和热处理技术的新成果,甚至未能充分发挥原有材料和原有工艺的潜力。而且零件热处理工艺的制订和热处理技术指标的制定也难免存在盲目性,很难做到产品内部组织与性能恰到好处地适应使用的要求,或者是可靠性得不到保证,或者是不必要地增大产品的体积和质量。热处理信息化有可能克服上述弊端,一个有重大前景的发展方向是将产品的计算机辅助设计、零件选材和热处理计算机模拟以及产品可靠性评估相结合,构成产品创新设计

平台(图 63),首先由产品 CAD 系统得出初试设计,接着用计算机模拟优化选材和热处理工艺,然后进行产品运行状况和失效过程的仿真,将零件各处所承受的应力和残余应力叠加,并和该处的强度进行比较,作出使用可靠性评估,经过反复叠代获得体积最小、质量最轻而又高度可靠性的产品设计。将热处理虚拟生产集成于产品虚拟制造中,对先进制造技术的发展有重大的作用。

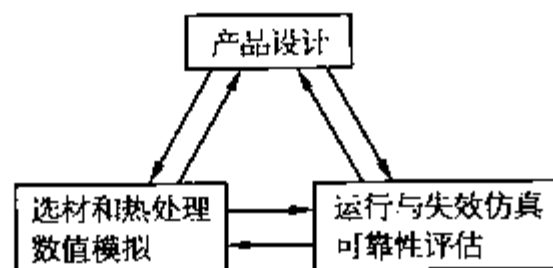


图 63 产品创新性设计平台

### 参考文献

- [1] 刘庄,吴肇基,吴景之等. 热处理过程的数值模拟. 北京: 科学技术出版社,1996
- [2] 潘健生,陈晓等. 热处理电炉计算机辅助设计,第六届全国热处理大会论文集. 北京: 兵器工业出版社,1995. 9: 358 - 361
- [3] 阮冬等. 特大型气体渗碳的流场动力学计算机模拟. 金属热处理,1999,(1): 31 - 40
- [4] 沈甫法等. 锚环淬火过程的计算机模拟及实验验证. 金属热处理学报,1999,20: 308 - 314
- [5] 潘健生,张伟民,田东等. 热处理数学模型与计算机模拟. 中国工程科学,2003,5(5): 47 - 54
- [6] 王勋成,邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法. 第二版. 北京: 清华大学出版社,1997
- [7] 柳百成. 未来的制造科学与技术. 北京: 高等教育出版社,2004
- [8] S Denis, P Archambault, E Gautier et al. Phase transformations and generation of heat treatment residual stresses in metallic alloys, Materials Science Forum, 2000, 347 - 349: 184 - 198
- [9] T Inoue. A cooperative activity on quenching process simulation, 材料热处理学报,2004,25(5): 28 - 34
- [10] Ju Dongying, ITO Yousuke, Inoue Tatsuo. Simulation and verification of residual stresses and distortion in carburizing-quenching process of a gear shaft. Proc. Of 4th Inter. Conf. on Quenching and the Control of Distortion, Beijing, China, 20 - 23. May, 2003; 291 - 296
- [11] Shi Wei et al. Model of stress-induced transformation and development of a simulation program for internal stresses during quenching. Proc. Of 4th Inter. Conf. on Quenching and the Control of Distortion, Beijing, China, 20 - 23. May, 2003; 131 - 136
- [12] 潘健生,张伟民. 热处理信息化在制造业跨越式发展中的作用. 上海科坛,2003,(3): 26 - 28
- [13] 潘健生,顾剑锋,宋冬利. 热处理 CAD/CAM/CAE[A]. 中国材料工程大典(第 15 卷)[M]. 北京: 化学工业出版社,2006
- [14] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社,2004
- [15] 田东. 界面突变淬火过程的计算机计算及实验测试. 上海交通大学博士学位论文,上海,1998
- [16] 潘健生等. 热处理数值模拟工程应用的一些尝试[J]. 金属热处理,2008,33(1): 3 - 8

# 附录

## 附录一 常用材料力学性能的名称及符号(新旧标准对照)

新 标 准		旧 标 准	
性 能 名 称	符 号	性 能 名 称	符 号
断面收缩率	$Z$	断面收缩率	$\psi$
断后伸长率	$A$ $A_{11.3}$ $A_{xmm}$	断后伸长率	$\delta_5$ $\delta_{10}$ $\delta_{xmm}$
断裂总伸长率	$A_t$		
最大力总伸长率	$A_{gR}$	最大力下的总伸长率	$\delta_{gR}$
最大力非比例伸长率	$A_g$	最大力下的非比例伸长率	$\delta_g$
屈服点延伸率	$A_e$	屈服点伸长率	$\delta_s$
屈服强度		屈服点	$\sigma_s$
上屈服强度	$R_{eH}$	上屈服点	$\sigma_{sH}$
下屈服强度	$R_{eL}$	下屈服点	$\sigma_{sL}$
规定非比例延伸强度	$R_p$ 例如 $R_{p0.2}$	规定非比例伸长应力	$\sigma_p$ 例如 $\sigma_{p0.2}$
规定总延伸强度	$R_t$ 例如 $R_{t0.5}$	规定总伸长应力	$\sigma_t$ 例如 $\sigma_{t0.5}$
规定残余延伸强度	$R_r$ 例如 $R_{r0.2}$	规定残余伸长强度	$\sigma_r$ 例如 $\sigma_{r0.2}$
抗拉强度	$R_m$	抗拉强度	$\sigma_b$
疲劳极限	$\sigma_{-1}$		
冲击吸收功	$A_k$		
冲击韧度	$\alpha_k$	GB/T229 1994 术语中已取消了冲击韧度一词,但旧标准中仍在使用的	

## 附录二 热处理专业名词解释

### 一、总类

1. 热处理 heat treatment 采用适当的方式对金属材料或工件(以下简称工件)进行加热、保温和冷却以获得预期的组织结构与性能的工艺。
2. 整体热处理 bulk heat treatment 对工件整体进行穿透加热的热处理。
3. 化学热处理 thermo-chemical treatment 将工件置于适当的活性介质中加热、保温,使一种或几种元素渗入它的表层,以改变其化学成分、组织和性能的热处理。
4. 化合物层 compound layer 化学热处理、物理气相沉积和化学气相沉积时在工件表面形成的化合物层。
5. 扩散层 diffusion zone 化学热处理时工件化合物层之下的渗层和化学气相沉积时化合物溶解并进行扩散的内层,统称扩散层。
6. 表面热处理 surface heat treatment 为改变工件表面的组织和性能,仅对其表面进行热处理的工艺。
7. 局部热处理 local heat treatment, partial heat treatment 仅对工件的某一部位或几个部位进行热处理的工艺。
8. 预备热处理 conditioning treatment 为调整原始组织以保证工件最终热处理或(和)切削加工质量,预先进行热处理的工艺。
9. 真空热处理 vacuum heat treatment, low pressure heat treatment 在低于 $1 \times 10^5$  Pa(通常是 $10^{-1} \sim 10^{-3}$  Pa)的环境中加热的热处理工艺。
10. 光亮热处理 bright heat treatment 工件在热处理过程中基本不氧化,表面保持光亮的热处理。
11. 磁场热处理 heat treatment in magnetic field, thermomagnetic treatment 为改善某些铁磁性材料的磁性能而在磁场中进行的热处理。
12. 可控气氛热处理 heat treatment in controlled atmosphere 为达到无氧化、无脱碳或按要求增碳,在成分可控的炉气中进行的热处理。
13. 保护气氛热处理 heat treatment in protective gases 在工件表面不氧化的气氛或惰性气体中进行的热处理。
14. 离子轰击热处理 plasma heat treatment, ion bombardment heat treatment, glow discharge heat treatment 在低于 $1 \times 10^5$  Pa(通常是 $10^{-1} \sim 10^{-3}$  Pa)的特定气氛中利用工件(阴极)和阳极之间等离子体辉光放电进行的热处理。
15. 流态床热处理 heat treatment in fluidized beds 工件在由气流和悬浮其中的固体粉粒构成的流态层中进行热处理。
16. 高能束热处理 high energy heat treatment 利用激光、电子束、等离子弧、感应涡流或火焰等高功率密度能源加热工件的热处理工艺总称。
17. 稳定化处理 stabilizing treatment, stabilizing 为使工件在长期服役的条件下形状和尺寸变化能够保持在规定范围内的热处理。
18. 形变热处理 thermomechanical treatment 将塑性变形和热处理结合,以提高工件力学性能的复合工艺。
19. 复合热处理 duplex heat treatment 将多种热处理工艺合理组合,以便更有效地改善工件使用性能的复合工艺。
20. 修复热处理 restoration heat treatment 指对长期运行后的热处理件(工件)在尚未发生不可恢复的



损伤之前,通过一定的热处理工艺,使其组织结构得以改善,使用性能或(和)几何尺寸得以恢复,服役寿命得以延长的热处理技术。

21. 清洁热处理 clean production heat treatment 作为一种可持续发展的生产方式之一的清洁热处理主要包括少、无污染,少、无氧化与节能的热处理技术。它反映了经济效益、社会效益与环境效益的统一。

22. 热处理工艺周期 thermal cycle, time temperature cycle, heat treatment cycle 通过加热、保温、冷却,完成一种热处理工艺过程的周期。

23. 加热制度 heating schedule 对一个工艺周期内工件或加热介质在加热阶段温度变化的规定。

24. 预热 preheating 为减少畸变,避免开裂,在工件加热至最终温度前进行的一次或数次阶段性保温的过程。

25. 加热速度 heating rate, rate of heating 在给定温度区间单位时间内工件或介质温度的平均增值。

26. 差温加热 differential heating 有目的地在工件中产生温度梯度的加热。

27. 纵向移动加热 scanning heating 工件在热源内纵向连续移动或热源沿工件纵向连续移动进行的加热。

28. 旋转加热 spin heating 工件在热源内(外)旋转进行的加热。

29. 保温 holding, soaking 工件或加热介质在工艺规定温度下恒温保持一定时间的操作。恒温保持的时间、温度分别称保温时间和保温温度。

30. 有效厚度 effective thickness 工件各部位壁厚不同时,如按某处壁厚确定加热时间即可保证热处理质量,则该处的壁厚称为工件的有效厚度。

31. 奥氏体化 austenitizing 工件加热至  $A_{c3}$  或  $A_{c1}$  以上,以全部或部分获得奥氏体组织的操作称为奥氏体化。工件进行奥氏体化的保温温度和保温时间分别称为奥氏体化温度和奥氏体化时间。

32. 可控气氛 controlled atmosphere 成分可按氧化—还原、增碳—脱碳效果控制的炉中气体混合物。其中包括放热式气氛、吸热式气氛、放热—吸热式气氛、有机液体裂解气氛、氮基气氛、氨制备气氛、木炭制备气氛和氢气等。

33. 吸热式气氛 endothermic atmosphere 将气体燃料和空气以一定比例混合,在一定的温度于催化剂作用下通过吸热反应裂解生成的气氛,可燃、易爆、具有还原性。一般用作工件的无脱碳加热介质或渗碳时的载气。

34. 放热式气氛 exothermic atmosphere 将气体燃料和空气以接近完全燃烧的比例混合,通过燃烧、冷却、除尘等过程制备的气氛。根据  $H_2$ 、 $CO$  的含量可分为浓型和淡型两种。浓型可燃、易爆,可作为退火、正火和淬火的无氧化、微脱碳加热保护气氛。淡型不可燃、不易爆,可作为无氧化加热保护气氛和使用吸热式气氛时的排除炉中空气的置换气氛。

35. 放热—吸热式气氛 exo-endothermic atmosphere 用吸热式气氛发生器原理制备,吸热式气氛的热源是放热式的燃烧。燃烧产物添加少量燃料即可进行吸热式反应。这种气氛兼有吸热和放热两种气氛的用途,且制备成本低,具有节能效果。

36. 滴注式气氛 drip feed atmosphere 把含碳有机液体(一般用甲醇)定量滴入加热到一定温度、密封良好的炉内,在炉内裂解形成的气氛。甲醇裂解气可用作渗碳载气,添加乙酸乙酯、丙酮、异丙醇、煤油等可提高碳势,作为渗碳气氛。

37. 氮基气氛 nitrogen-base atmosphere 一般指含氮在 90% 以上的混合气体、精净化放热式气氛、氨燃烧净化气氛、空气液化分馏氮气,用碳分子筛常温空气分离制氮和薄膜空分制氮的气氛都属此类。当前,后两种气氛使用较多。氮基气氛,即使是高纯氮也含微量氧,直接使用不能使工件获得无氧化加热效果,一般需添加少量甲醇。氮基气氛可用作工件无氧化加热保护气氛,也可用作渗碳载气。

38. 合成气氛 artificial atmosphere 把纯氮和甲醇裂解气按一定比例混合可视作吸热式气氛作为渗碳载气,此即合成气氛。碳分子筛和薄膜空分制氮法问世后,配制合成气氛被认为是一种便宜和节能的可控气氛制备方法。尤其在我国,采用合成气氛是解决制备可控气氛气源的一条主要出路。

39. 直生式气氛 direct prepared atmosphere 将气体燃料和空气按吸热式气氛的比例配好,直接通入渗

碳炉中,在炉内裂解成所需成分的气氛。利用氧探头、微处理机及碳势控制系统,可以实现这种气氛的碳势精确控制。采用直生式气氛省略了气体发生炉,可以节约能耗。

40. 中性气氛 neutral atmosphere 在给定温度下不与被加热工件发生化学反应的气氛。
41. 氧化气氛 oxidizing atmosphere 在给定温度下与被加热工件发生氧化反应的气氛。
42. 还原气氛 reducing atmosphere 在给定条件下可使金属氧化物还原的气氛。
43. 冷却制度 cooling schedule 对工件热处理冷却条件(冷却介质、冷却速度)所作的规定。
44. 冷却速度 cooling rate 热处理冷却过程中在某一指定温度区间或某一指定温度区间或某一温度下,工件温度随时间下降的速率。前者称为平均冷却速度,后者称为瞬时冷却速度。
45. 马氏体临界冷却速度 critical cooling rate 工件淬火时可抑制非马氏体转变的冷却速度低限。
46. 冷却曲线 cooling curve 显示热处理冷却过程中工件温度随时间变化的曲线。
47. 特性冷却曲线 characteristic cooling curve 规定试样的心部冷却速度随温度变化的特性曲线,它反映了液态介质对试样在不同温度下的冷却速度。
48. 炉冷 furnace cooling 工件在热处理炉中加热保温后,切断炉子能源,使工件随炉冷却的方式。
49. 淬冷烈度 quenching intensity 表征淬火介质从热工件中吸取热量的能力的指标,以  $H$  值来表示。几种介质的淬火冷却烈度见附表 1。

附表 1 淬火冷却烈度  $H$ 

搅动情况	空气	油	水	盐水
静止	0.02	0.25~0.30	0.9~1.0	2.0
中等	—	0.35~0.40	1.1~1.2	—
强	—	0.50~0.80	1.6~2.0	—
强烈	0.08	0.80~1.10	4.0	5.0

50. 等温转变 isothermal transformation 工件奥氏体化后,冷却到临界点( $A_{r1}$  或  $A_{r3}$ )以下等温保持时过冷奥氏体发生的转变。

51. 连续冷却转变 continuous cooling transformation 工件奥氏体化后以不同冷却速度连续冷却时过冷奥氏体发生的转变。

52. 等温转变图,奥氏体等温转变图 isothermal transformation diagram(TTT curve) 过冷奥氏体在不同温度等温保持时,温度、时间与转变产物所占百分数(转变开始及转变终止)的关系曲线图。

53. 连续冷却转变图,奥氏体连续冷却转变图 continuous cooling transformation diagram(CCT curve) 工件奥氏体化后连续冷却时,过冷奥氏体开始转变及转变终止的时间、温度及转变产物与冷却速度之间的关系曲线图。

54. 孕育期 incubation period 工件的不平衡组织在给定温度恒温保持时,从到达该温度至开始发生组织转变所经历的时间。

## 二、退火、正火类

1. 退火 annealing 工件加热到适当温度,保持一定时间,然后缓慢冷却的热处理工艺。
2. 再结晶退火 recrystallization annealing 经冷塑性变形加工的工件加热到再结晶温度以上,保持适当时间,通过再结晶使冷变形过程中产生的晶体学缺陷基本消失,重新形成均匀的等轴晶粒,以消除形变强化效应和残余应力的退火。
3. 等温退火 isothermal annealing 工件加热到高于  $A_{c3}$ (或  $A_{c1}$ ) 的温度,保持适当时间后,较快地冷却到珠光体转变温度区间的适当温度并等温保持,使奥氏体转变为珠光体类组织后在空气中冷却的退火。
4. 球化退火 spheroidizing annealing, spheroidizing 为使工件中的碳化物球状化而进行的退火。
5. 预防白点退火 hydrogen relief annealing 为防止工件在热形变加工后的冷却过程中因氢呈气态析出

而形成发裂(白点),在形变加工完结后直接进行的退火。其目的是使氢扩散到工件之外。

6. 脱氢处理 baking, dehydrogenation 在工件组织不发生变化的条件下,通过低温加热、保温,使工件内的氢向外扩散的退火。

7. 光亮退火 bright annealing 工件在热处理过程中基本不氧化,表面保持光亮的退火。

8. 中间退火 process annealing, intermediate annealing, interstage annealing 为消除工件形变强化效应、改善塑性、便于实施后继工序而进行的工序间退火。

9. 均匀化退火 homogenizing, diffusion annealing 以减少工件化学成分和组织的不均匀程度为主要目的,将其加热到高温并长时间保温,然后缓慢冷却的退火。

10. 稳定化退火 stabilizing annealing 为使工件中微细的显微组成物沉淀或球化的退火。例如某些奥氏体不锈钢在 850℃ 附近进行稳定化退火,沉淀出 TiC、NbC、TaC,防止耐晶间腐蚀性能降低。

11. 去应力退火 stress relieving, stress relief annealing 为去除工件塑性变形加工、切削加工或焊接造成的内应力及铸件内存在的残余应力而进行的退火。

12. 完全退火 full annealing 将工件完全奥氏体化后缓慢冷却,获得接近平衡组织的退火。

13. 部分退火 partial annealing, incomplete annealing 将工件部分奥氏体化后缓慢冷却的退火。

14. 晶粒粗化退火 coarse-grained annealing 将工件加热至比正常退火较高的温度,保持较长时间,使晶粒粗化以改善材料被切削加工性能的退火。

15. 双联退火 double annealing 中间不冷至室温,前后接续的两次退火。

16. 快速退火 rapid annealing 采用高能束或其他能源将工件加热至比正常退火较高的温度并短暂保温的退火。

17. 亚相变点退火 subcritical annealing 工件在低于  $A_{c1}$  的温度进行的退火工艺的总称。其中包括亚相变点球化退火、再结晶退火、去应力退火等。

18. 连续退火 continuous annealing 用连续作业炉实施的退火。

19. 可锻化退火 malleablizing 使成分适宜的白口铸铁中的碳化物分解并形成团絮状石墨的退火。

20. 石墨化退火 graphitizing treatment 为使铸铁内莱氏体中的渗碳或(和)游离渗碳体分解而进行的退火。

21. 装箱退火 box annealing, close annealing, pot annealing, coffin annealing, pack annealing 将工件装入有保护介质的密封容器中加热的退火。

22. 真空退火 vacuum annealing 在低于  $1 \times 10^5$  Pa(通常是  $10^{-1} \sim 10^{-3}$  Pa)的环境中进行的退火。

23. 感应加热退火 induction annealing 利用感应涡流加热进行的退火。

24. 火焰退火 flame annealing 利用火焰加热进行的退火。

25. 等温形变珠光体化处理 isoforming 工件加热奥氏体化后,过冷到珠光体转变区的中段,在珠光体形成过程中塑性加工成形的联合工艺。

26. 晶粒细化处理 structural grain refining 以减小工件晶粒尺寸或改善组织均匀性为目的而进行的热处理。

27. 正火 normalizing 工件加热奥氏体化后在空气中冷却的热处理工艺。

28. 二段正火 two-step normalizing 工件加热奥氏体化后,在静止的空气中冷却到  $A_{r1}$  附近即转入炉中缓慢冷却的正火。

29. 等温正火 isothermal normalizing 工件加热奥氏体化后,采用强制吹风快冷到珠光体转变区的某一温度,并保温以获得珠光体型组织,然后在空气中冷却的正火。

### 三、淬火类

1. 淬火 quench hardening, transformation hardening 工件加热奥氏体化后以适当方式冷却获得马氏体或(和)贝氏体组织的热处理工艺。最常见的有水冷淬火、油冷淬火、空冷淬火等。

2. 淬火冷却,淬冷 quenching 工件淬火周期中的冷却部分。

3. 局部淬火 selective hardening, localized quench hardening 仅对工作需要硬化的局部进行的淬火。
4. 表面淬火 surface hardening 仅对工件表层进行的淬火。其中包括感应淬火、接触电阻加热淬火、火焰淬火、激光淬火、电子束淬火等。
5. 气冷淬火 gas quenching 专指在真空中加热和在高速循环的负压、常压或高压的中性和惰性气体中进行的淬火冷却。
6. 风冷淬火 forced air hardening, air blast hardening 以强迫流动的空气或压缩空气作为冷却介质的淬火冷却。
7. 盐水淬火 brine hardening 以盐类的水溶液作为冷却介质的淬火冷却。
8. 有机聚合物水溶液淬火 glycol hardening, polymer solution hardening 以有机高分子聚合物的水溶液作为冷却介质的淬火冷却。
9. 喷液淬火 spray hardening 用喷射液流作为冷却介质的淬火冷却。
10. 喷雾冷却 fog hardening 工件在水和空气混合喷射的雾中进行的淬火冷却。
11. 热浴淬火 hot bath hardening 工件在熔盐、熔碱、熔融金属或高温油等热浴中进行的淬火冷却,如盐浴淬火、铅浴淬火、碱浴淬火等。
12. 双介质淬火,双液淬火 interrupted quenching, timed quenching 工件加热奥氏体化后先浸入冷却能力强的介质,在组织即将发生马氏体转变时立即转入冷却能力弱的介质中冷却。
13. 加压淬火,模压淬火 press hardening, die hardening 工件加热奥氏体化后在特定夹具夹持下进行的淬火冷却,其目的在于减少淬火冷却畸变。
14. 透淬 through hardening 工件从表面至心部全部硬化的淬火。
15. 贝氏体等温淬火,等温淬火 austempering 工件加热奥氏体化后快冷到贝氏体转变温度区间等温保持时奥氏体转变为贝氏体的淬火。
16. 马氏体分级淬火,分级淬火 martempering 工件加热奥氏体化后浸入温度稍高或稍低于  $M_s$  点的碱浴或盐浴中保持适当时间,在工件整体达到介质温度后取出空冷以获得马氏体的淬火。
17. 亚温淬火 intercritical hardening 亚共析钢工件在  $A_{c1} \sim A_{c3}$  温度区间奥氏体化后淬火冷却获得马氏体及铁素体组织的淬火。
18. 直接淬火 direct quenching 工件渗碳后直接淬火冷却的工艺。
19. 两次淬火 double quenching 工件渗碳冷却后,先在高于  $A_{c3}$  的温度奥氏体化并淬冷以细化心部组织,随即在略高于  $A_{c1}$  的温度奥氏体化以细化渗层组织的淬火。
20. 自冷淬火 self quench hardening 工件局部或表层快速加热奥氏体化后,加热区的热量自行向未加热区传导,从而使奥氏体化区迅速冷却的淬火。
21. 脉冲淬火 impulse hardening 用高功率密度的脉冲束使工件表层加热奥氏体化,热量随即在极短的时间内传入工件内部的自冷淬火。
22. 电子束淬火 electron beam hardening 以电子束作为能源,以极快的速度加热工件的自冷淬火。
23. 激光淬火 laser hardening, laser transformation hardening(LTH) 以激光作为能源,以极快的速度加热工件的自冷淬火。
24. 火焰淬火 flame hardening, torch hardening 利用氧—乙炔(或其他可燃气体)火焰使工件表层加热并快速冷却的淬火。
25. 感应淬火 induction hardening 利用感应电流通过工件所产生的热量,使工件表层、局部或整体加热并快速冷却的淬火。
26. 接触电阻加热淬火 contact hardening 借助电极(高导电材料的滚轮)与工件的接触电阻加热工件表层,并快速冷却(自冷)的淬火。
27. 电解液淬火 electrolytic hardening 工件欲淬硬的部位浸入电解溶液中接阴极,电解液槽接阳极,通电后由于阴极效应而将浸入部位加热奥氏体化,断电后被电解液冷却的淬火。

28. 光亮淬火 bright quenching, clean hardening 工件在可控气氛、惰性气体或真空中加热,并在适当介质中冷却,或盐浴加热在碱浴中冷却,以获得光亮或光洁金属表面的淬火。

29. 形变淬火 ausforming 工件热加工成形后由高温淬冷的淬火。常用的是锻造余热淬火。

30. 延迟淬火,预冷淬火 delay quenching 工件加热奥氏体化后浸入淬火冷却介质前先在空气中停留适当时间(延迟时间)的淬火。

31. 定时淬火 time quenching 工件在淬冷介质中按工艺规定时间停留的淬火。

32. 冷处理 subzero treatment, cold treatment 工件淬火冷却到室温后,继续在一般制冷设备或低温介质中冷却的工艺。

33. 深冷处理 cryogenic treatment 工件淬火后继续在液氮或液氮蒸气中冷却的工艺。

34. 淬硬性 hardening capacity 以钢在理想条件下淬火所能达到的最高硬度来表征的材料特征。

35. 淬透性 hardenability 以在规定条件下钢试样淬硬深度和硬度分布表征的材料特性。

36. 淬硬层 quench hardened case, quenched case 工件从奥氏体状态急冷硬化的表层。一般以有效淬硬深度来定义。

37. 有效淬硬深度 effective hardening depth 从淬硬的工件表面量至规定硬度值(一般为 550 HV)处的垂直距离。

38. 临界直径 critical diameter 钢制圆柱试样在某种介质中淬冷后,中心得到全部马氏体或 50% 马氏体组织的最大直径,以  $d_c$  表示。

39. 理想临界直径 ideal critical diameter 在淬火冷却烈度为无限大的理想淬冷介质中淬火冷却时,圆柱钢试样全部淬透的临界直径,用  $d_{ic}$  表示。

40. 端淬试验 jominy test, end quenching test 将标准端淬试样( $\phi 25 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ )加热奥氏体化后,在专用设备上对其下端喷水冷却,冷却后沿轴线方向测出硬度—距水冷端距离关系曲线的试验方法。它是测定钢的淬透性的主要方法。

41. 淬透性曲线 hardenability curve 用钢试样进行端淬试验测得的硬度—距水冷端距离的关系曲线。

42. 淬透性带 hardenability band 同一牌号的钢因化学成分或奥氏体晶粒度的波动而引起的淬透性曲线变动的范围。

43. U形曲线 hardness penetration diagram 用圆柱形试样测定钢的淬透性时,淬火后横截面上沿直径方向的硬度分布曲线,一般呈 U 形。

44. 硬度分布 hardness profile 工件淬火后,硬度从表面向心部随距离的变化。

45. 索氏体化处理,派登脱处理 patenting 高强度钢丝或钢带制造中的一种特殊热处理方法。其工艺过程是将中碳钢或高碳钢线材或带材加热奥氏体化后在  $A_{c1}$  以下适当温度(约  $500^\circ\text{C}$ )的热浴中等温或在强制流动的气流中冷却以获得索氏体或以索氏体为主的组织,这种组织适于冷拔,冷拔后可获得优异的强韧性配合。可分为铅浴索氏体化处理、盐浴索氏体化处理、风冷索氏体化处理和流态床索氏体化处理等多种。

#### 四、回火类

1. 回火 tempering 工件淬硬后加热到  $A_{c1}$  以下的某一温度,保温一定时间,然后冷却到室温的热处理工艺。

2. 真空回火 vacuum tempering 工件在真空炉中先抽到一定真空度,然后充惰性气体的回火。

3. 加压回火 press tempering 同时施加压力以校正淬火冷却畸变的回火。

4. 自热回火,自回火 self tempering 利用局部或表层淬硬工件内部的余热使淬硬部分回火。

5. 自发回火 auto tempering 形成马氏体的快速冷却过程中因工件  $M_s$  点较高而自发地发生回火的现象。低碳钢在淬火冷却时就发生这一现象。

6. 低温回火 low temperature tempering, first stage tempering 工件在  $250^\circ\text{C}$  以下进行的回火。

7. 中温回火 medium temperature tempering 工件在 250~500℃之间进行的回火。
8. 高温回火 high temperature tempering 工件在 500℃以上进行的回火。
9. 多次回火 multiple tempering 工件淬硬后进行的两次或两次以上的回火。
10. 二次硬化 secondary hardening 一些高合金钢在一次或多次回火后硬度上升的现象。这种硬化现象是由于碳化物弥散析出和(或)残留奥氏体转变为马氏体或贝氏体所致。
11. 回火色 temper color 回火时在工件表面形成的氧化膜的颜色。回火色因回火温度及时间不同而异,如 230℃为黄色,265℃为棕红色等。
12. 耐回火性 temper resistance 工件回火时抵抗软化的能力。
13. 调质 quenching and high temperature tempering 工件淬火并高温回火的复合热处理工艺。

## 五、固溶热处理类

1. 固溶处理 solution treatment 工件加热至适当温度并保温,使过剩相充分溶解,然后快速冷却以获得过饱和固溶体的热处理工艺。
2. 水韧处理 water toughening 为改善某些奥氏体钢的组织以提高材料韧度,将工件加热到高温使过剩相溶解,然后水冷的热处理。例如高锰钢(Mn13)加热到 1 000~1 100℃保温后水冷,以消除沿晶界或滑移带析出的碳化物,从而得到高韧度和高耐磨性。
3. 沉淀硬化 precipitation hardening 在过饱和固溶体中形成溶质原子偏聚区和(或)析出弥散分布的强化相而使金属硬化的热处理。
4. 时效处理,时效 ageing treatment 工件经固溶处理或淬火后在室温或高于室温的适当温度保温,以达到沉淀硬化的目的。在室温下进行的时效称自然时效,在高于室温下进行的时效称人工时效。
5. 分级时效处理 interrupted ageing treatment, interrupted ageing, step ageing treatment, step ageing 工件固溶处理后进行二次或多次逐级提高温度加热的人工时效处理。
6. 过时效处理 overageing 工件经固溶处理后用比能获得最佳力学性能高得多的温度或长得多的时间进行的时效处理。
7. 马氏体时效处理 marageing 含碳极低的铁基合金马氏体的沉淀硬化处理。
8. 天然稳定化处理 seasoning 将铸铁件在露天长期(数月乃至数年)放置,使铸件的内应力逐渐松弛,并使其尺寸趋于稳定。
9. 回归 reversing 某些经固溶处理的铝合金自然时效硬化后,在低于固溶处理的温度(120~180℃)短时间加热后力学性能恢复到固溶热处理状态的现象。
10. 形变时效 refining 铝合金、铜合金冷塑性加工与时效相结合的复合处理。

## 六、渗碳类

1. 渗碳 carburizing, carburization 为提高工件表层的含碳量并在其中形成一定的碳含量梯度,将工件在渗碳介质中加热、保温,使碳原子渗入的化学热处理工艺。
2. 固体渗碳 pack carburizing, solid carburizing, box carburizing, powder carburizing 将工件放在填充粒状渗碳剂的密封箱中进行的渗碳。
3. 膏剂渗碳 paste carburizing 工件表面以膏状渗碳剂涂覆进行的渗碳。
4. 盐浴渗碳,液体渗碳 salt bath carburizing 工件在含有渗碳剂的熔盐中进行的渗碳。
5. 气体渗碳 gas carburizing 工件在含碳气体中进行的渗碳。
6. 滴注式渗碳 drip feed carburizing 将苯、醇、酮、煤油等液体渗碳剂直接滴入炉内裂解进行的气体渗碳。
7. 离子渗碳 plasma carburizing, ion carburizing, glow discharge carburizing 在低于  $1 \times 10^5$  Pa(通常是  $10 \sim 10^{-1}$  Pa)渗碳气氛中,利用工件(阴极)和阳极之间产生的辉光放电进行的渗碳。
8. 流态床渗碳 fluidized bed carburizing 在含碳的流态床中进行的渗碳。

9. 电解渗碳 electrolytic carburizing 在作为阴极的工件和与之同置于盐浴中的石墨阳极之间接通电源进行的渗碳。
10. 真空渗碳 partial pressure carburizing, vacuum carburizing, low pressure carburizing 在低于  $1 \times 10^5$  Pa(通常是  $10 \sim 10^{-1}$  Pa)的条件下于渗碳气氛中进行的渗碳。
11. 高温渗碳 high temperature carburizing 在  $950^\circ\text{C}$ 以上进行的渗碳。
12. 局部渗碳 localized carburizing, selective carburizing 仅对工件某一部分或某些区域进行的渗碳。
13. 穿透渗碳 homogeneous carburizing 薄工件从表面至中心全部渗透的渗碳。
14. 碳化物弥散强化渗碳 carbide dispersion carburizing 使渗碳表层获得细小分散碳化物以提高工件服役能力的渗碳。
15. 薄层渗碳 sheet carburizing 工件渗碳淬火后,表面总硬化层深度或有效硬化层深度小于或等于  $0.3\text{ mm}$ 的渗碳。
16. 深层渗碳 deep carburizing 工件在渗碳淬火后有效硬化层深度达  $3\text{ mm}$ 以上的渗碳。
17. 复碳 carbon restoration 工件因某种原因脱碳后,为恢复初始碳含量而进行的渗碳。
18. 碳势 carbon potential 表征含碳气氛在一定温度下改变工件表面含碳量能力的参数,通常用氧探头监控,用低碳碳素钢箔片对含碳气氛中的平衡含碳量定量监测。
19. 露点 dew point 指气氛中水蒸气开始凝结的温度。露点与气氛中的水汽含量成正比,气氛中的水汽含量愈高,露点愈高。进行气体渗碳时,可通过测定露点间接确定气氛的碳势。
20. 强渗期 carburizing period, boost period 工件在高碳势渗碳气氛条件下进行渗碳,使其表面迅速达到高碳浓度的阶段。
21. 扩散期 diffusion period 强渗结束后,特意降低气氛碳势使由富碳表层向内扩散的碳量超过介质传递给工件表面的碳量从而使渗层碳浓度梯度趋于平缓的阶段。
22. 渗碳层 carburized case, carburized zone 渗碳工件含碳量高于原材料的表层。
23. 碳含量的分布 carbon profile 在沿渗碳工件与表面垂直方向上,碳在渗层中的分布。
24. 渗碳层深度 carburized case depth, carburized depth 由渗碳工件表面向内至碳含量为规定值(一般  $w_c = 0.4\%$ )处的垂直距离。
25. 渗碳淬火有效硬化层深度 carburizing and hardening effective case depth 由渗碳淬火后的工件表面测定到规定硬度( $550\text{ HV}$ )处的垂直距离,以  $D_c$ 表示。测定硬度时所用的试验力为  $9.807\text{ N}$ 。
26. 碳活度 carbon activity 与渗碳有关的碳活度通常是指碳在奥氏体中的活度。它与奥氏体中碳的浓度成正比,比值称为活度系数。这个活度系数又是温度、奥氏体中溶入的合金元素品种及各自的浓度以及碳的浓度的函数。其物理意义是碳在奥氏体中的有效浓度。
27. 碳可用率 carbon availability 在气氛碳势从  $1\%$ 降至  $0.9\%$ 时,  $1\text{ m}^3$ (标准状态下)气体可传递到工件表面的碳量(以  $\text{g}/\text{m}^3$ 表示)。
28. 碳传递系数 carbon mass transfer coefficient, carbon transfer coefficient, carbon transfer value 单位时间(s)内气氛传递到工件表面单位面积的碳量(碳通量)与气氛碳势和工件表面含碳量(碳钢)之间的差值之比。
29. 空白渗碳 blank carburizing 为预测工件渗碳后心部组织特征及可达到的力学性能,用试样在中性介质中进行与原定渗碳淬火周期完全相同的热处理。
30. 碳化物形成元素 carbide forming element, carbide former 钢铁中与碳的化学亲和力比铁高的合金元素。

## 七、渗氮类

1. 渗氮,氮化 nitriding, nitrogen case hardening 在一定温度下于一定介质中使氮原子渗入工件表层的化学热处理工艺。



2. 液体渗氮 liquid nitriding 在含渗氮剂的熔盐中进行的渗氮。
3. 气体渗氮 gas nitriding 在可提供活性氮原子的气体中进行的渗氮。
4. 离子渗氮 plasma nitriding, ion nitriding, glow discharge nitriding 在低于  $1 \times 10^5$  Pa (通常是  $10^{-1} \sim 10^{-3}$  Pa) 的渗氮气氛中, 利用工件(阴极)和阳极之间产生的辉光放电进行的渗氮。
5. 一段渗氮 single stage nitriding 在一定温度和一定氮势下进行的渗氮。
6. 多段渗氮 multiple stage nitriding 在两个或两个以上的温度和多种氮势条件下分别进行的渗氮。
7. 退氮 denitriding 为使渗氮件表层去除过多的氮而进行的工艺过程。
8. 氮化物 nitride 氮与金属元素形成的化合物。碳钢渗氮时常见的氮化物有  $\gamma' - \text{Fe}_x\text{N}$ 、 $\epsilon - \text{Fe}_{2-3}\text{N}$ 、 $\xi - \text{Fe}_2\text{N}$  等。
9. 氨分解率 ammonia dissociation rate 气体渗氮时, 通入炉中的氨分解为氢和活性氮原子的程度, 一般以百分比值来表示。在一定渗氮温度下, 氨分解率取决于供氨量。供氨愈多, 分解率愈低, 工件表面氮含量愈高。供氨量固定时, 温度愈高, 分解率愈高。氨分解率是渗氮的重要工艺参数。
10. 氮势 nitrogen potential 表征渗氮气氛在一定温度下向工件提供活性氮原子能力的参数。通常通过调整氨分解率进行监控, 氨流量愈大, 氨分解率愈低, 气氛氮势愈高。
11. 渗氮层深度 nitrified case depth 渗氮层包括化合物层(白亮层)和扩散层, 其深度从工件表面测至与基体组织有明显分界处或规定的界限硬度值处的垂直距离, 以  $D_N$  表示。
12. 复合氮化物 complex nitride 两种或多种元素(通常是金属元素)与氮构成的化合物。
13. 氮化物形成元素 nitride forming element, nitride former 钢中与氮的化学亲和力比铁高的合金元素。
14. 渗氮白亮层 nitride layer, white layer 渗氮工件表层以  $\epsilon - \text{Fe}_{2-3}\text{N}$  为主的白亮层, 也叫化合物层。

## 八、渗其他非金属类及渗金属类

1. 渗硼 boriding, boronizing 将硼渗入工件表层的化学热处理工艺。其中包括用粉末或颗粒状的渗硼介质进行的固体渗硼, 用熔融渗硼介质进行的液体渗硼, 在电解的熔融渗硼介质中进行的电解渗硼, 用气体渗硼介质进行的气体渗硼。
2. 离子渗硼 plasma boriding, ion boriding, glow discharge boriding 在低于  $1 \times 10^5$  Pa (通常是  $10^{-1} \sim 10^{-3}$  Pa) 的渗硼气体介质中, 利用工件(阴极)和阳极之间产生的辉光放电进行的渗硼。
3. 硼化物层 boride layer 渗硼过程中在工件表面形成的硼的化合物层。
4. 渗硅 siliconizing 将硅渗入工件表层的化学热处理工艺。其中包括用粉末渗硅介质进行的固体渗硅, 用气体渗硅介质进行的气体渗硅。
5. 渗硫 sulphurizing 将硫渗入工件表层的化学热处理工艺。
6. 渗金属 diffusion metallizing, metal cementation 工件在含有被渗金属元素的渗剂中加热到适当温度并保温, 使这些元素渗入表层的化学热处理工艺。其中包括渗铝、渗锌、渗钛、渗钒、渗钨、渗锰、渗锑、渗铍和渗镍等。
7. 离子渗金属 ion infiltration of metal 工件在含有被渗金属的等离子场中加热到较高温度, 金属原子以较高速率在表面沉积并向内部扩散的工艺。

## 九、共渗类

1. 多元共渗 multicomponent thermochemical treatment 将两种或多种元素同时渗入工件表层的化学热处理工艺。
2. 碳氮共渗 carbonitriding 在奥氏体状态下同时将碳、氮渗入工件表层, 并以渗碳为主的化学热处理工艺。
3. 液体碳氮共渗 cyaniding, liquid cyaniding 在一定温度下以含氰化物的熔盐为介质进行的碳氮共渗。



4. 气体碳氮共渗 gas carbonitriding, dry cyaniding 在含碳、氮的气体介质中进行的碳氮共渗。
5. 离子碳氮共渗 glow discharge carbonitriding, plasma carbonitriding, ion carbonitriding 在低于  $1 \times 10^5$  Pa (通常是  $10 \sim 10^{-1}$  Pa) 的含碳、氮气体中, 利用工件(阴极)和阳极之间的辉光放电进行的碳氮共渗。
6. 氮碳共渗, 软氮化 nitrocarburizing 工件表层同时渗入氮和碳, 并以渗氮为主的化学热处理工艺。在气体介质中进行的称气体氮碳共渗, 在盐浴中进行的称液体氮碳共渗。
7. 硫氮共渗 sulpho-nitriding 向工件表层同时渗入硫和氮的化学热处理工艺。
8. 硫氮碳共渗 sulpho-nitrocarburizing, sulphidizing 工件在含有氰盐和硫化物的熔盐中同时渗入硫、碳和氮的化学热处理工艺。
9. 氧氮共渗, 氧氮化 oxynitriding 渗氮介质中添加氧的渗氮工艺。
10. 氧氮碳共渗 oxynitrocarburizing 氧参与渗入的氮碳共渗工艺。
11. 铬铝共渗 chromoaluminizing 铬和铝同时渗入工件表层的化学热处理工艺。与此类同的有铬铝硅共渗、铬硼共渗、铬硅共渗、铬钒共渗、铝硼共渗和钒硼共渗。

## 十、表面处理及复合热处理类

1. 发蓝处理, 发黑 bluing 工件在空气—水蒸气或化学药物的溶液中在室温或加热到适当温度, 在工件表面形成一层蓝色或黑色氧化膜, 以改善其耐蚀性和外观的表面处理工艺。
2. 蒸气处理 steam treatment 工件在  $500 \sim 560^\circ\text{C}$  的过热蒸气中加热并保持一定时间, 在工件表面形成一层致密的氧化膜的表面处理工艺。
3. 磷化 phosphating 把工件浸入磷酸盐溶液中, 在工件表面形成一层不溶于水的磷酸盐薄膜的表面处理工艺。
4. 喷砂 sand blasting 以  $400 \sim 600$  kPa 的压缩空气将砂粒高速喷射到工件表面上, 以清除工件表面的氧化皮和粘附物。为减少喷砂粉尘对环境和人体的危害, 现多采用液体喷砂。
5. 喷丸 shot peening 利用抛丸器或喷嘴将钢丸高速射向工件表面, 以清除工件表面的氧化皮和粘附物。如抛射速度足够大, 可在工件的表面形成压应力, 达到提高工件疲劳强度的目的。
6. 离子注入 ion implantating 将预先选择的元素原子电离, 经电场加速, 获得高能量后注入工件表面的工艺。
7. 渗碳淬火加低温渗硫处理 carburizing quenching and sulphurizing treatment 工件渗碳淬火后再经  $200^\circ\text{C}$  以下的低温电解渗硫以降低摩擦副的摩擦因数, 提高其耐磨性的复合热处理工艺。
8. 渗氮加淬火 nitriding and quench hardening 工件经渗氮或氮碳共渗后加热到  $\alpha + \gamma' - \text{Fe}_4\text{N}$  共析温度以上后淬冷, 使表面形成厚层含氮马氏体的复合化学热处理工艺。通常采用感应加热到  $760 \sim 780^\circ\text{C}$  水冷淬火的方式。
9. 盐浴氮碳共渗复合处理 QPQ treatment 工件先在盐浴中进行氮碳共渗和氧化处理, 经中间抛光后, 再在氧化盐浴中处理, 以提高工件耐磨性和抗蚀性的复合热处理工艺。
10. 镍磷镀时效 nickel-phosphorous coating and ageing 用化学镀或电镀方式在工件表面镀镍磷层后再  $400 \sim 500^\circ\text{C}$  时效, 以进一步提高硬度和耐磨性的复合工艺。

## 十一、沉积类

1. 化学气相沉积 chemical vapor deposition (CVD) 通过化学气相反应在工件表面形成薄膜的工艺。
2. 等离子体增强化学气相沉积 plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD), plasma assisted chemical vapor deposition (PACVD) 利用各种等离子体的能量促使反应气体离解、活化以增强化学反应的化学气相沉积。其中包括射频放电等离子体化学气相沉积、微波等离子体化学气相沉积、ERC(电子回旋共振)微波等离子体化学气相沉积、直流电弧等离子体喷射化学气相沉积等。
3. 火焰沉积 combustion flame chemical vapor deposition, flame deposition 采用高温火焰加热, 使反

应气体离解、活化的化学气相沉积。

4. 热丝辅助化学气相沉积 hot filament chemical vapor deposition(HFCVD) 采用通电的灯丝加热反应气体的化学气相沉积。

5. 电子束辅助热丝化学气相沉积 electron assisted hot filament CVD(EACVD) 采用在灯丝和衬底间施加偏压的方法产生等离子体,提高沉积速率,改善薄膜材料质量的化学气相沉积。

6. 激光辅助化学气相沉积 laser assisted chemical vapor deposition(LCVD) 利用激光的热或光子能量效应使反应气体活化的化学气相沉积。其中包括光化学气相沉积,光热解化学气相沉积等。

7. 金属有机化合物化学气相沉积 metallo-organic chemical vapor-deposition(MOCVD) 利用金属有机化合物作为反应气体的化学气相沉积。

8. 物理气相沉积 physical vapor deposition(PVD) 在真空加热条件下利用蒸发、辉光放电、弧光放电、溅射等物理方法提供原子、离子,使之在工件表面沉积形成薄膜的工艺。其中包括蒸发镀、溅射沉积、磁控溅射以及各种离子束沉积方法等。

9. 离子镀 ion plating 在真空条件下,利用气体放电使气体或被蒸发物质部分电离,并在气体离子或被蒸发物质离子的轰击下,将蒸发物质或其反应物沉积在基片上的方法。其中包括磁控溅射离子镀、反应离子镀、空心阴极放电离子镀(空心阴极蒸发镀膜)、多弧离子镀(阴极电弧离子镀)等。

## 十二、组织类

1. 金相检验 metallographic examination 泛指对金属宏观组织及显微组织进行的检验。

2. 相 phase 指金属组织中化学成分、晶体结构和物理性能相同的组分。其中包括固溶体、金属化合物及纯物质(如石墨)。

3. 组织 structure 泛指用金相观察方法看到的由形态、尺寸不同和分布方式不同的一种或多种相构成的总体,以及各种材料缺陷和损伤。

4. 宏观组织,低倍组织 macrostructure 金属试样的磨面经适当处理后用肉眼或借助放大镜观察到的组织。

5. 显微组织 microstructure 将用适当方法(如浸蚀)处理后的金属试样的磨面或其复型或用适当方法制成的薄膜置于光学显微镜或电子显微镜下观察到的组织。

6. 晶粒 grain 多晶体材料内以晶界分开、晶体学位向基本相同的小晶体。

7. 晶界 grain boundary 多晶体材料中相邻晶粒的界面。相邻晶粒晶体学位向差小于 $10^\circ$ 的晶界称为小角晶界,相邻晶粒晶体学位向差较大的晶界称为大角晶界。

8. 相界面 interphase boundary 相邻两种相的分界面。两相的点阵在跨越界面处完全匹配者称为共格界面,部分匹配者称为半共格界面,基本不匹配者称为非共格界面。

9. 亚晶粒 subgrain 晶粒内相互间晶体学位向差很小(小于 $3^\circ$ )的小晶块。亚晶粒之间的界面称为亚晶界。

10. 晶粒度 grain size 意指多晶体内晶粒的大小。可用晶粒号、晶粒平均直径、单位面积或单位体积内的晶粒数目定量表征。

11. 晶粒号 grain size number 由美国材料试验协会(ASTM)制定,并被世界各国采用的一种表达晶粒大小的编号。晶粒号( $N$ )与放大100倍的视野上每平方英寸面积内的晶粒数( $n$ )之间的关系为 $n=2^{N-1}$ 。实际检验时一般采用放大100倍的组织与标准晶粒号图片对比的方法判定。

12. 树枝组织 dendritic structure 金属铸件中呈树枝状的晶体(晶粒)。

13. 共晶组织 eutectic structure 金属凝固时,由液相同时析出,紧密相邻的两种或多种固相构成的铸态组织。

14. 共析组织 eutectoid structure 固态金属自高温冷却时,从同一母相中同时析出,紧密相邻的两种或多种不同的相构成的组织。

15. 针状组织 acicular structure 含有一种(或多种)针状相的组织。

16. 片层状组织 lamellar structure 两种或多种薄层状相交替重叠形成的共晶组织、共析组织及其他组织。

17.  $\alpha$  铁  $\alpha$ -iron 在 921℃ 以下稳定存在, 晶体结构为体心立方的纯铁。

18.  $\gamma$  铁  $\gamma$ -iron 在 921~1390℃ 稳定存在, 晶体结构为面心立方的纯铁。

19. 铁素体 ferrite  $\alpha$  铁中溶入一种或多种溶质元素构成的固溶体。

20. 奥氏体 austenite  $\gamma$  铁中溶入碳和(或)其他元素构成的固溶体。它是以英国冶金学家 R. Austen 的名字命名的。

21. 渗碳体 cementite 晶体结构属于正交系, 化学式为  $\text{Fe}_3\text{C}$  的金属化合物。是钢和铸铁中常见的固相。

22. 碳化物 carbide 钢铁中碳与一种或数种金属元素构成的金属化合物的总称。两种金属元素与碳构成的化合物称为三元碳化物或复合碳化物, 如  $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 、 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$  等。三种或更多种金属元素与碳构成的化合物  $(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{W}, \text{V})_3\text{C}$ 、 $\text{Fe}_3(\text{W}, \text{Mo})_3\text{C}$  等只能被称为复合碳化物。

23.  $\epsilon$  碳化物  $\epsilon$ -carbide 密排六方结构, 化学式为  $\text{Fe}_2_4\text{C}$  的过渡型碳化物。

24.  $\chi$  碳化物, 黑格碳化物  $\chi$ -carbide, Hagg carbide 高碳钢中的片状马氏体回火析出的一种过渡型碳化物。晶体结构属单斜系, 化学式为  $\text{Fe}_5\text{C}_2$ 。

25. 珠光体 pearlite, lamellar pearlite 铁素体薄层(片)与碳化物(包括渗碳体)薄层(片)交替重叠组成的共析组织。

26. 珠光体领域 pearlite colony 铁素体、碳化物薄片位向大致相同的一个珠光体团所占的空间。

27. 索氏体 sorbite, fine pearlite 在光学金相显微镜下放大 600 倍以上才能分辨片层的细珠光体。它是以英国冶金学家 H. C. Sorby 的名字命名的。

28. 托氏体 troostite, nodular fine pearlite 在光学金相显微镜下已无法分辨片层的极细珠光体。它是以法国金相学家 L. Troost 的名字命名的。

29. 马氏体 martensite 钢铁或非铁金属中通过无扩散共格切变型转变(马氏体转变)形成的产物统称马氏体。钢铁中马氏体转变的母相是奥氏体, 由此形成的马氏体化学成分与奥氏体相同, 晶体结构为体心正方, 可被看作是过饱和  $\alpha$  固溶体, 主要形态是板条状和片状。它是以德国冶金学家 A. Martens 的名字命名的。

30. 莱氏体 ledeburite 铸铁或高碳高合金钢中由奥氏体(或其转变的产物)与碳化物(包括渗碳体)组成的共晶组织。它是以德国冶金学家 A. Ledebur 的名字命名的。

31. 石墨 graphite 碳的一种同素异构体, 晶体结构属于六方系, 是铸铁中常出现的固相。其空间形态有片状、球状、团絮状、蠕虫状等。

32. 先析相 pro-eutectoid phase 固溶体发生共析转变前析出的固相。例如先析铁素体, 先析碳化物等。

33. 脱溶物 precipitate 过饱和固溶体中形成的溶质原子偏聚区(如铝铜合金中的 GP 区)或化学成分及晶体结构与之不同的析出相(例如铝铜合金人工时效时形成的  $\text{CuAl}_2$ )。

34. 弥散相 dispersed phase 从过饱和固溶体中析出或在化学热处理渗层中形成以及在其他生产条件下形成的细小、弥散分布的固相。

35. 贝氏体 bainite 钢铁奥氏体化后, 过冷到珠光体转变温度区与  $M_s$  之间的中温区等温, 或连续冷却通过这个中温区时形成的组织。这种组织由过饱和  $\alpha$  固溶体和碳化物组成。它是以美国冶金学家 E. C. Bain 的名字命名的。

36. 上贝氏体 upper bainite 在较高的温度范围内形成的贝氏体。其典型形态是以大致平行、碳轻微过饱和的铁素体板条为主体, 短棒状或短片状碳化物分布于板条之间。在含硅、铝的合金钢中碳化物全部或部分被残留奥氏体所取代。

37. 下贝氏体 lower bainite 在较低温度范围内形成的贝氏体。其主体是双凸透镜片状碳过饱和铁素体, 片中分布着与片的纵向轴呈  $55^\circ \sim 65^\circ$  平行排列的碳化物。

38. 残留奥氏体, 残存奥氏体 retained austenite 工件淬火冷却至室温后残存的奥氏体。

39. 魏氏组织 widmanstatten structure 组织组分之一呈片状或针状沿母相特定晶面析出的显微组织。

是以从铁-镍陨石中发现这种组织的奥地利矿物学家 A. J. Widmanstätten 的名字命名的。

40. 带状组织 banded structure 金属材料中两种组织组分呈条带状沿热变形方向大致平行交替排列的组织。例如钢材中的铁素体带-珠光体带,珠光体带-渗碳体带等。

41. 粒状珠光体 globular pearlite 碳化物呈颗粒状弥散分布于铁素体基体中的珠光体。

42. 亚组织,亚结构 substructure 只有借助电子显微镜才能观察到的组织结构,例如位错、层错、微细孪晶、亚晶粒等。

43. 位错 dislocation 晶体中常见的一维缺陷(线缺陷)。在透射电子显微镜下金属薄膜试样的衍衬像中表现为弯曲的线条。

44. 层错 stacking fault 面心立方、密排六方、体心立方等常见金属晶体中密排晶面堆垛层次局部发生错误而形成的二维晶体学缺陷(面缺陷)。在透射电子显微镜下的金属薄膜试样衍衬像中表现为若干平直干涉条纹组成的带。

45. 位错塞积 dislocation pile up 滑动中的位错列在领先位错受阻时形成塞积的现象,在透射电子显微镜下金属薄膜试样衍衬像中表现为接近平行排列的短弧线。

46. 空位 vacancy 晶体结构中原子空缺的位置。属于零维晶体学缺陷。

47. 织构 texture 金属中诸晶粒晶体学位向接近一致的组织。

48. 母相 parent phase 由之转变为新相的原始相。

49. 二次马氏体 secondary martensite 工件回火冷却过程中残留奥氏体发生转变形成的马氏体。

### 十三、热处理缺陷类

1. 氧化 oxidation 工件加热时,介质中的氧、二氧化碳和水蒸气等与之反应生成氧化物的过程。

2. 内氧化 internal oxidation 工件加热时介质中生成的氧沿工件表层的晶界向内扩散,发生晶界合金元素氧化的过程。

3. 脱碳 decarburization 工件加热时介质与工件中的碳发生反应,使表层含碳量降低的现象。

4. 炭黑 soot 热处理时附着到工件、夹具、炉壁表面形成的非晶态碳。

5. 淬火冷却开裂 quench cracking 淬火冷却时工件中产生的内应力超过材料断裂强度,在工件上形成裂纹的现象。

6. 淬火冷却畸变 quenching distortion 工件原始尺寸或形状于淬火冷却时发生的人们所不希望的变化。

7. 淬火冷却应力 quenching stresses 工件淬火冷却时,因不同部位出现瞬间温差及组织转变不同步而产生的内应力。

8. 热应力 thermal stresses 工件加热和(或)冷却时,由于不同部位出现温差而导致热胀和(或)冷缩不均所产生的应力。

9. 相变应力 transformation stresses 热处理过程中因工件不同部位组织转变不同步而产生的内应力。

10. 残留应力 residual stresses, internal stresses 工件在各部位已无温差且不受外力作用的条件下存留下来的内应力。

11. 软点 soft spots 工件淬火硬化后,表面硬度偏低的局部小区域。

12. 过烧 burning 工件加热温度过高,致使晶界氧化和部分熔化的现象。

13. 过热 overheating 工件加热温度偏高而使晶粒过度长大,以致力学性能显著降低的现象。

14. 氢脆 hydrogen embrittlement 工件因吸收氢而导致韧性降低和延时断裂强度降低的现象。

15. 白点 flak, white spot 工件中的氢呈气态析出引起的一种缺陷。在纵向断口上表现为接近圆形或椭圆形的银白色斑点,在浸蚀后的宏观磨片上表现为发裂。

16. 黑色组织 black structure 含铬、锰、硅等合金元素的渗碳工件渗碳淬火后可能出现的缺陷组织,在光学金相显微镜下呈断续的黑色网,是内氧化的结果。

17. 网状碳化物组织 carbide network 渗碳介质活性过强,渗碳阶段温度偏高,扩散阶段温度偏低或渗

碳时间偏长,致使工件表层中碳化物沿奥氏体晶界呈网状析出而形成的缺陷组织。

18.  $\sigma$ 相脆性  $\sigma$ -embrittlement 高铬合金钢因析出 $\sigma$ 相而引起的脆化现象。

19. 回火脆性 temper brittleness 工件淬火后在某些温度区间回火产生的脆性。

20. 不可逆回火脆性,第一类回火脆性 350℃ embrittlement 工件淬火后在约350℃回火时产生的回火脆性。

21. 可逆回火脆性,第二类回火脆性 reversible temper brittleness 含有铬、锰、铬-镍等元素的合金钢工件淬火后,在脆化温度区(400~550℃)回火,或在更高温度回火后缓慢冷却所产生的脆性。这种脆性可通过高于脆化温度的再次回火并快速冷却予以消除。消除后,若再次在脆化温度区回火或在更高的温度回火后缓慢冷却,则重新脆化。

#### 十四、热处理设备类

1. 热处理设备 heat treatment installation 用于实现炉料各项热处理工艺的加热、冷却或各种辅助作业的设备。

2. 热处理成套设备 complete set of heat treatment installation 由一台或多台热处理炉和必要的冷却及其他辅助装置按预定热处理工序布置的设备组合。

3. 热处理炉 heat treatment furnace 供炉料热处理加热用的电炉或燃料炉。

4. 燃料炉 fuel-fired furnace 以燃料燃烧作为热源用于加热炉料的成套设备。按燃料不同,可分为燃气炉、燃油炉、燃煤炉。

5. 电热设备,电炉 electro-heat installation, electric furnace 以电能转换成热能用于加热炉料的成套设备,一般指由电热装置及其在操作和使用中所必须配备的其他电气和机械装置所组成。

6. 电热装置 electro-heat equipment 把电能转换成热能用于加热炉料的装置。

7. 间歇式炉,非连续式炉 discontinuous furnace 周期性装卸炉料的炉子。

8. 箱式炉 box type furnace 炉膛呈箱形,具有供水平装卸炉料用炉门的间歇式炉。

9. 井式炉 pit furnace 炉膛呈井形,炉料从炉子顶部装卸的间歇式炉。

10. 台车式炉 bogie hearth furnace, car bottom furnace 炉底做成活动台车,在台车拉出炉外后装卸炉料的间歇式炉。

11. 底开式炉 drop bottom furnace 炉口向下,炉门侧向开闭,炉料在炉内悬挂加热的间歇式炉。通常炉口下方装有淬火槽,以便炉料迅速下降淬火。

12. 罩式炉 bell furnace 炉座固定,加热炉罩可移动或加热炉罩固定,炉座可升降的间歇式炉。

13. 转筒式炉 rotary retort furnace 具有耐热钢炉罐,加热时炉罐绕中心轴线旋转,加热后炉体倾斜倒出炉料的间歇式炉。

14. 连续式炉 continuous furnace 加热过程中炉料在炉内连续地或步进地输送的炉子。

15. 链条输送式炉 chain conveyor furnace 炉料由链条输送装置输送的连续式炉。

16. 辊底式炉 roller hearth furnace 炉料由辊子输送的连续式炉。

17. 车底式炉 bogie furnace 炉底由多个小车组成,炉料放置在小车上输送前进的连续式炉。

18. 步进式炉 walking beam furnace 炉料由机械装置沿炉床交替抬升和放落从而逐步向前输送的连续式炉。

19. 转底式炉 rotary hearth furnace 具有能绕着垂直轴旋转的圆形或环形炉底,并有进料口和出料口(有时只有一个口)的连续式炉。

20. 滚筒式炉 rotary retort furnace with internal screw 具有带内螺旋的炉罐,炉料随炉罐旋转输送的连续式炉。

21. 传送带式炉 conveyor belt furnace 炉料由传送带输送装置输送的连续式炉。

22. 推送式炉 pusher furnace 炉料由推送装置输送的连续式炉。

23. 振底式炉 shaker hearth furnace 炉料由振动输送装置输送的连续式炉。

24. 牵引式炉 drawing furnace 炉料由卷绕系统牵引通过炉膛的卧式连续式炉,主要用于处理线材或带材。
25. 重力输送式炉 gravity feed furnace 炉料靠自身重力运动前进的连续式炉。
26. 隧道式炉 tunnel furnace 炉膛呈隧道形的卧式连续式炉。
27. 控制气氛炉 controlled atmosphere furnace 炉料在控制气氛中进行加热的炉子。
28. 箱式淬火炉 sealed box type quenching furnace 具有箱形加热室、前室和淬火油槽,炉料在炉内完成淬火工艺的热处理炉。
29. 浴炉 bath furnace 炉料浸没在处于工作温度下的液体加热介质中进行加热的炉子。按加热介质不同可分为盐浴炉、油浴炉、铅浴炉、碱浴炉。
30. 加热式浴炉,坩埚式浴炉 externally-heated bath furnace 热源位于坩埚(或浴槽)外部的浴炉。
31. 流态粒子炉 fluidized bed furnace 炉膛中具有处于流动状态的粒子的炉子。热或冷的气体(可能是反应气体)通过炉膛,由于粒子的运动而使传热得到加速。
32. 红外炉 infra-red furnace 由红外加热元件作为热源的炉子。
33. 多工区炉 multi-working zone furnace 具有多个不同工艺要求的工作区的炉子,工作时各区的温度一般不相同。
34. 控制气氛 controlled atmosphere 成分可控制在预定范围内的气氛(在某些情况下,可采用自动控制)。
35. 保护气氛炉 protective atmosphere furnace 炉内用来保护炉料使之在加热时避免或减少氧化和脱碳的气氛热处理炉。
36. 真空炉 vacuum furnace 炉膛内低于一个大气压的热处理炉。

### 附录三 标准代号及常用计量单位

#### 一、标准代号

GB	强制性国标	HJ	环境保护	QJ	航天
GB/T	推荐性国标	HY	海洋	SH	石油化工
GB/Z	国标指导性文件	JB	机械	SJ	电子
CB	船舶	JC	建材	SY	石油天然气
CJ	城镇建设	JG	建筑行业	TB	铁路运输
DL	电力	JT	交通	WS	卫生
EJ	核工业	LD	劳动和劳动安全	YB	黑色冶金
FZ	纺织	MH	民用航空	YS	有色冶金
GA	公共安全	MT	煤炭	YY	医药
GY	广播电影电视	NY	农业	DZ	地质矿产
HB	航空	QB	轻工	LY	林业
HG	化工	QC	汽车	YD	通讯

## 二、部分国家标准代号

ГОСТ	俄罗斯	DIN	德国	NF	法国
KS	韩国	W-Nr	德国	SNV	瑞士
IS	印度	ASTM	美国	CSA	加拿大
JIS	日本	UNS	美国	AS	澳大利亚
SIS	瑞典	BS	英国		

## 三、热处理常用计量单位

物理量	单位名称	单位符号	物理量	单位名称	单位符号	物理量	单位名称	单位符号
长度	米	m	时间	秒	s	电压	伏(特)	V
	厘米	cm		分	min	功率	瓦(特)	W
	毫米	mm		小时	h		千瓦	kW
面积	平方米	m <sup>2</sup>	物质的量	摩(尔)	mol	能量	焦(耳)	J
	平方厘米	cm <sup>2</sup>	流量	克每分钟	g/min		牛顿·米	N·m
	平方毫米	mm <sup>2</sup>		升每小时	L/h		千瓦·时	kW·h
体积	立方米	m <sup>3</sup>	密度	克每立方厘米	g/cm <sup>3</sup>	频率	赫(兹)	Hz
	立方厘米	cm <sup>3</sup>		千克每立方米	kg/m <sup>3</sup>	力	牛(顿)	N
容积	升	L		克每升	g/L	压力	帕(斯卡)	Pa
	毫升	mL	电流	安(培)	A	摄氏温度	摄氏度	℃
质量	千克(公斤)	kg	电容	法(拉)	F	热力学温度	开(尔文)	K
	克	g	电阻	欧(姆)	Ω			

## 四、十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	词头符号	所表示的因数	词头名称	词头符号
10 <sup>6</sup>	兆	M	10 <sup>-1</sup>	分	d
10 <sup>3</sup>	千	k	10 <sup>-2</sup>	厘	c
10 <sup>2</sup>	百	H	10 <sup>-3</sup>	毫	m
10 <sup>1</sup>	十	da	10 <sup>-6</sup>	微	μ

## 附录四 常用结构钢、工模具钢、不锈钢和 铸铁的化学成分及中外牌号对照

### 一、常用结构钢的化学成分和中外牌号对照

中国 GB	化学成分 (质量分数, %)											国外牌号对照				
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	其他	日本 JIS	美国 ASTM	德国 W-Nr	法国 NF	英国 BS	俄罗斯 ГОСТ		
08F	0.05~0.11	≤0.03	0.25~0.50	≤0.10		≤0.30		Cu≤0.25	S08K	≈1008	1.0336			08K11		
15	0.12~0.18	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25	S15C	1015	L 0401 1.1141	C12 XC15	040A15 080M15	15		
25	0.22~0.29	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25	S25C	1025	1.1158	C25E XC25	C25E 070M26	25		
35	0.32~0.39	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25	S35C	1035	1.1181	C35E XC38	C35E 080M36	35		
45	0.42~0.50	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25	S45C	1045	1.1191	C45E XC48	C40E 080M46	45		
55	0.52~0.60	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25	S55C	1055	1.1203	C55E XC55	C55E 070M55	55		
65	0.62~0.70	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25	SUP2	1065	1.1231	XC65	060A67	65		
70	0.67~0.75	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25		1070		XC70	070A72	70		
85	0.82~0.90	0.17~0.37	0.50~0.80	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25	SUP3	1086	1.1269	XC85	060A86	85A		
20Mn	0.17~0.23	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25		1022	1.0469	20M5	080A20	20T		
30Mn	0.27~0.34	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25		1033	1.1146	32M5	080A30	30T		
40Mn	0.37~0.44	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25	(SWRH42E)	1039	1.1157	40M5	080A40	40T		
50Mn	0.48~0.56	0.17~0.37	0.70~1.00	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25	(SWRH52B)	1053			080A52	50T		
65Mn	0.62~0.70	0.17~0.37	0.90~1.20	≤0.25		≤0.30		Cu≤0.25		1066			080A67	65T		



(续表)

钢号	化学成分 (质量分数, %)											国外钢号对照					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	其他	日本 JIS	美国 ASTM	德国 W-Nr	法国 NF	英国 BS	俄罗斯 ГОСТ			
中国 GB																	
20Mn2	0.17~0.24	0.17~0.37	1.40~1.80						SMn420	1320	L 1169	20M5	150M19	20Г2			
40Mn2	0.37~0.44	0.17~0.37	1.40~1.80						SMn438	1340		40M5		40Г2			
50Mn2	0.47~0.55	0.17~0.37	1.40~1.80								L 0913	55M5		50Г2			
20MnV	0.17~0.24	0.17~0.37	1.30~1.60				0.07~0.12				L 5217						
35SiMn	0.32~0.40	1.10~1.40	1.10~1.40								L 5122	38MS5	En46	35CT			
42SiMn	0.39~0.45	1.10~1.40	1.10~1.40								L 5121	41S7	En46	42CT			
55Si2Mn	0.52~0.60	1.50~2.00	0.60~0.90	≤0.35		≤0.35				9255	L 0904	55S7	250A53	55C2Г			
60Si2MnA	0.56~0.64	1.60~2.00	0.60~0.90	≤0.35		≤0.35			SUP6		L 0909	60S7		60C2Г			
60Si2CrVA	0.56~0.64	1.40~1.80	0.40~0.70	0.90~1.20		≤0.35	0.10~0.20				L 0961	60SC7		60C2XFA			
60CrMnMoA	0.56~0.64	0.17~0.37	0.70~1.00	0.70~1.00	0.25~0.35	≤0.35			SUP13	4160	L 7701	≈51CDV4	705H50				
50CrVA	0.46~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.00		≤0.35	0.10~0.20		SUP10	6150	L 8159	50CrV4	735A50	50XFA			
45B	0.42~0.49	0.17~0.37	0.60~0.90					B: 0.0005~ 0.0035		14B35							
45MnB	0.42~0.49	0.17~0.37	1.10~1.40					B: 0.0005~ 0.0035		14B50		38MB5	185H40				
20Cr	0.18~0.24	0.17~0.37	0.50~0.80	0.70~1.00					SCr420	5120	L 7027	18C3	527A20	20X			
30Cr	0.27~0.34	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10					SCr430	5130	L 7030	32C4	530A30	30X			
40Cr	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10					SCr440	5140	L 7035	42C4	530A40 530M40	40X			
50Cr	0.47~0.54	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10						5150		50C4		50X			
12CrMo	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.40~0.70	0.40~0.55					4119	L 7335	12CD4	1501-620	12XM			
20CrMo	0.17~0.24	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.15~0.25				SCr420	4118	L 7264	18CD4	CUS12	20XM			
30CrMoA	0.26~0.33	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.15~0.25				SCr430			30CD4					
35CrMo	0.32~0.40	0.17~0.37	0.40~0.70	0.80~1.10	0.15~0.25				SCr435	4135	L 7220	35CD4	708A37	35XM			

(续表)

钢号 中国 GB	化学成分 (质量分数, %)										国外钢号对照					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	其他	日本 JIS	美国 ASTM	德国 W-Nr	法国 NF	英国 BS	俄罗斯 IOCT		
42CrMo	0.38~0.45	0.17~0.37	0.50~0.80	0.90~1.20	0.15~0.25				SCM440	4140	1.7225	42CD4	708M40			
12CrMoV	0.08~0.15	0.17~0.37	0.40~0.70	0.30~0.60	0.25~0.35		0.15~0.30			4119	1.7335	12CD4	U-27	12XMF		
35CrMoV	0.30~0.38	0.17~0.37	0.40~0.70	1.00~1.30	0.20~0.30		0.10~0.20		SCM435	4135	1.7220	35CD4	CDS13	35XMF		
38CrMoAl	0.35~0.40	0.20~0.45	0.30~0.60	1.35~1.65	0.15~0.25			Al, 0.70~ 1.10			1.8509	40CAD6, 12	905MB9	38XMOA		
25Cr2Mo1VA	0.22~0.29	0.17~0.37	0.50~0.80	2.10~2.50	0.90~1.10		0.30~0.50		SM4C420	5120	1.7733			25X2M1Φ		
20CrMn	0.17~0.23	0.17~0.37	0.90~1.20	0.90~1.20							1.7147	20MC5		20XJ		
30CrMnSiA	0.28~0.34	0.90~1.20	0.80~1.10	0.80~1.10										30XTC		
20CrMnMo	0.17~0.23	0.17~0.37	0.90~1.20	1.10~1.40	0.20~0.30				SCM421	4119				18XTM		
40CrMnMo	0.37~0.45	0.17~0.37	0.90~1.20	0.90~1.20	0.20~0.30				SCM440	4142	1.7225		708A42	40XTM		
20CrMnTi	0.17~0.23	0.17~0.37	0.80~1.10	1.00~1.30				Ti, 0.04~ 0.10			1.8401			18XJT		
20CrNi	0.17~0.23	0.17~0.37	0.40~0.70	0.45~0.75		1.00~1.40				3140	1.5711		640M40	20XH		
12CrNi2	0.10~0.17	0.17~0.37	0.30~0.60	0.60~0.90		1.50~1.90				3415	1.5732	14NCL1		12XH2A		
20CrNi3	0.17~0.24	0.17~0.37	0.30~0.60	0.60~0.90		2.75~3.15			SNC415			20NCL1		20XHBA		
37CrNi3	0.34~0.41	0.17~0.37	0.30~0.60	1.20~1.60		3.00~3.50										
18Cr2NiWA	0.13~0.19	0.17~0.37	0.30~0.60	1.35~1.65		4.00~4.50		W: 0.80~ 1.20	~SNC815	3316	1.5752	18NCL3	≈665M13	18X2H4BA		
20CrNiMo	0.17~0.23	0.17~0.37	0.60~0.95	0.40~0.70	0.20~0.30	0.35~0.75			SNCM220	8520	1.6523	20NCL2	805M20	20XHM		
40CrNiMoA	0.37~0.44	0.17~0.37	0.50~0.80	0.60~0.90	0.15~0.25	1.25~1.65			SNCM439	4340	1.6511	40NCL8	816M40	40XHM		
45CrNiMoVA	0.42~0.49	0.17~0.37	0.50~0.80	0.80~1.10	0.20~0.30	1.30~1.80	0.10~0.20		SNCM439	4340	1.6511	40NCL8	816M40	45XH2MΦA		
Y12	0.08~0.16	0.15~0.35	0.70~1.00						SUM21	B112	1.0271	13MF4		Al2		
Y15Pb	0.10~0.18	<0.15	0.80~1.20					Pb, 0.15~ 0.35	SUM22L	12L13	1.0718	C250Pb				

(续表)

钢号	化学成分 (质量分数, %)											国外钢号对照					
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	其他	日本 JIS	美国 ASTM	德国 W-Nr	法国 NF	英国 BS	俄罗斯 TUCT			
中国 GB																	
Y30	0.27~0.35	0.15~0.35	0.70~1.00							1130				A30			
Y40Mn	0.37~0.45	0.15~0.35	1.20~1.55						SUM42	1141		40M5	212M44	A40T			
Y45Ca	0.42~0.50	0.20~0.40	0.60~0.90					Ca: 0.002~0.006									
GC4	0.95~1.05	0.15~0.35	0.15~0.30	0.35~0.50	≤0.08	≤0.25		Cu≤0.20									
GC15	0.95~1.05	0.15~0.35	0.25~0.45	1.40~1.65	≤0.10	≤0.30		Cu≤0.25	SUJ2	E52100	1.3505	100C6	535A99	10X15			
GC15SiMn	0.95~1.05	0.45~0.75	0.95~1.25	1.40~1.65	≤0.10	≤0.30		Cu≤0.25			1.3502	100CM6		10X15TC			
GC15SiMo	0.95~1.05	0.65~0.85	0.20~0.40	1.40~1.70	0.30~0.40	≤0.30		Cu≤0.25									
G20CrMo	0.17~0.23	0.20~0.35	0.65~0.95	0.35~0.65	0.08~0.15			Cu≤0.25		A5344118H	1.7321						
G20CrNiMo	0.17~0.23	0.15~0.40	0.60~0.90	0.35~0.65	0.15~0.30	0.40~0.70		Cu≤0.25	SNOM220	A5348620H	1.6523	20NCD2	805A20				
G20CrNi2Mo	0.17~0.23	0.15~0.40	0.40~0.70	0.35~0.65	0.20~0.30	1.60~2.00		Cu≤0.25	SNOM420	A5344320H		20NCD7		20X12M			
G20Cr2Ni4	0.17~0.23	0.15~0.40	0.30~0.60	1.25~1.75		3.25~3.75		Cu≤0.25						20X2H4A			
G10CrNi3Mo	0.08~0.13	0.15~0.40	0.40~0.70	1.00~1.40	0.08~0.15	3.00~3.50		Cu≤0.25		A5349310H			832H13				
G20Cr2Ni2Mo	0.17~0.23	0.15~0.40	1.30~1.60	1.70~2.00	0.20~0.30	≤0.30		Cu≤0.25									
95Cr18	0.90~1.00	≤0.80	≤0.80	17.00~19.00		≤0.30		Cu≤0.25	SUS440C					95X18			
102Cr18Mo	0.95~1.10	≤0.80	≤0.80	16.00~18.00	0.40~0.70	≤0.30		Cu≤0.25	SUS440C	A75640C	1.3543	Z100CD17					
ZC200-400	≤0.20	≤0.50	≤0.80					残余元素	SC410	415-205	1.0416			15J1			
ZC230-450	≤0.30	≤0.50	≤0.90					Cu≤0.30	SC450	450-240	1.0446	GE230	A1	25J1			
ZC270-500	≤0.40	≤0.50	≤0.90					Cr≤0.35	SC480	485-275	1.0552	GE280	A2	35J1			
ZC310-570	≤0.50	≤0.60	≤0.90					Ni≤0.30	SOCS	(80-40)	1.0558	GE320		45J1			
ZC40Mn	0.35~0.45	0.30~0.45	1.20~1.50					Mo≤0.20	SCM3		1.1168						
ZC40Cr	0.35~0.45	0.20~0.40	0.50~0.80	0.80~1.10				V≤0.05						40X1			
ZG20SiMn	0.12~0.22	0.60~0.80	1.00~1.30			≤0.40			SCW480	1.0C	1.1120	G20M6		20GC1			

(续表)

钢号 中国 GB	化学成分 (质量分数, %)										国外钢号对照				
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	其他	日本 JIS	美国 ASTM	德国 W-Nr	法国 NF	英国 BS	俄罗斯 ГОСТ	
ZG35SiMn	0.30~0.40	0.60~0.80	1.10~1.40								1.5122				
ZG35CrMo	0.30~0.37	0.30~0.50	0.50~0.80	0.80~1.20	0.20~0.30						1.7220	G35CrMo4		35XCrMo1	
ZG35CrMoSi	0.30~0.40	0.50~0.75	0.90~1.20	0.50~0.80										35XCrSi1	

## 二、常用工模具钢的化学成分和中外钢号对照

钢号 中国 GB	化学成分 (质量分数, %)										国外钢号对照				
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	其他	日本 JIS	美国 ASTM	德国 W-Nr	法国 NF	英国 BS	瑞典 SIS	
T7	0.65~0.74	≤0.35	≤0.40						SK7		1.1620	(C70E2U)		1770	
T8	0.75~0.84	≤0.35	≤0.40						SK5 SK6	W1A-B	1.1625	(C80E2U)		1778	
T8Mn	0.80~0.90	≤0.35	0.40~0.60						SK5		1.1830				
T10	0.95~1.04	≤0.35	≤0.40						SK3 SK4	W1A-91/2	1.1645	(C105E2U)	BW1B	1880	
T10A	0.95~1.04	≤0.35	≤0.40								1.1545	C105E2U		1880	
T12	1.15~1.24	≤0.35	≤0.40								1.1663	C120E3U	BW1C	1885	
9SiCr	0.85~0.95	1.20~1.60	0.30~0.60	0.95~1.25					SK2	W1A-111/2	1.2108			2092	
Cr2	0.95~1.10	≤0.40	≤0.40	1.30~1.65					SUJ2	L3	1.2067	Y100C5	BL1 BL3		
9Cr2	0.80~0.95	≤0.40	≤0.40	1.30~1.70							1.2056		BL3		
W	1.05~1.25	≤0.40	≤0.40	0.10~0.30		0.80~1.20					1.2414		BF1	2705	
5CrW2Si	0.45~0.55	0.50~0.80	≤0.40	1.00~1.30		2.00~2.50			≈SKS21	SI	1.2542	≈45WCrV8		≈2710	
Cr12	2.00~2.30	≤0.40	≤0.40	11.50~13.00					SKD1	D8	1.2080	X200Cr12	B08		
Cr12MoV	1.45~1.70	≤0.40	≤0.40	11.00~12.50	0.40~0.60		0.15~0.30		SKD11		1.2601			2310	

(续表)

钢号 中国 GB	化学成分 (质量分数, %)											国外钢号对照					
	C	S	Mn	Cr	Mo	W	V	其他	日本 JIS	美国 ASTM	德国 W-Nr	法国 NF	英国 BS	瑞典 SIS			
Cr12Mo1V1	1.40~1.60	≤0.60	≤0.60	11.00~13.00	0.70~1.20		≤1.10	Co: <1.00		D2	1.2379	X160CrMoV12	BH2				
Cr5Mo1V	0.95~1.05	≤0.60	≤1.00	4.75~5.50	0.90~1.40		0.15~0.50		SKD12	A2	1.2363	X160CrMoV5	BA2	2280			
9Mn2V	0.85~0.95	≤0.40	1.70~2.00				0.10~0.25			02	1.2842	90MnV8	BC2				
CrWMn	0.90~1.05	≤0.40	0.80~1.10	0.90~1.20		1.20~1.60			SKS31		1.2419	105WCr5					
9CrWMn	0.85~0.95	≤0.40	0.90~1.20	0.50~0.80		0.50~0.80			SKS3	01	1.2510	90MnWCrV5	B01	2140			
5CrMnMo	0.50~0.60	0.25~0.60	1.20~1.60	0.60~0.90	0.15~0.30						1.2311						
5CrNiMo	0.50~0.60	≤0.40	0.50~0.80	0.50~0.80	0.15~0.30			Ni: 1.40~1.80	SKT4	L6	L.2713	55NiCrMoV7	BH2A/5	≈2550			
3Cr2W8V	0.30~0.40	≤0.40	≤0.40	2.20~2.70		7.50~9.00	0.20~0.50		SKD6	H21	L.2581	X30WCrV9	BH21	2730			
4Cr5MoSV	0.33~0.43	0.80~1.20	0.20~0.50	4.75~5.50	1.10~1.60		0.30~0.60		SKD6	H11	1.2343	X38CrMoV5	BH11				
4Cr5MoSiV1	0.32~0.42	0.80~1.20	0.20~0.50	4.75~5.50	1.10~1.75		0.80~1.20		SKD61	H13	1.2344	X40CrMoV5	BH13				
3Cr2Mo	0.28~0.40	0.20~0.80	0.60~1.00	1.40~2.00	0.30~0.55					P20							
W18Cr4V	0.70~0.80	0.20~0.40	0.10~0.40	3.80~4.40	<0.30	17.50~19.00	1.00~1.40		SKH2	T1	1.3355	HS18-0-1	BT1	2750			
W18Cr4VC6	0.70~0.80	0.20~0.40	0.10~0.40	3.75~4.50	0.40~1.00	17.50~19.00	0.80~1.20	Co: 4.25~5.75	SKH3	T4	1.3255	HS18-1-1-5	BT4	2754			
W18Cr4V2Co8	0.75~0.85	0.20~0.40	0.20~0.40	3.75~5.00	0.50~1.25	17.50~19.00	1.80~2.40	Co: 7.00~9.50	≈SKH4	T5	1.3265	HS18-0-2-9	BT5	2756			
W6Mo5Cr4V2	0.80~0.90	0.20~0.45	0.15~0.40	3.80~4.40	4.50~5.50	5.50~6.75	1.75~2.20		SKH9	M2	1.3343		HM2	2722			
W6Mo5Cr4V3	1.00~1.10	0.20~0.45	0.15~0.40	3.75~4.50	4.75~5.50	5.00~6.75	2.25~2.75		SKH52	M3							
W6Mo5Cr4V2Co5	0.80~0.90	0.20~0.45	0.15~0.40	3.75~4.50	4.50~5.50	5.50~6.50	1.75~2.25	Co: 4.50~5.50	SKH55		1.3243	HS6-5-2-5		2723			
W2Mo6Cr4V2	0.97~1.05	0.20~0.55	0.15~0.40	3.50~4.00	8.20~9.20	1.40~2.10	1.75~2.25			M7	1.3348	HS2-9-2		2782			
W2Mo6Cr4VCo8	1.05~1.15	0.15~0.65	0.15~0.40	3.50~4.20	9.00~10.00	1.15~1.85	0.95~1.35	Co: 7.75~8.75	SKH59	M42	1.3247	HS2-9-1-8	BM42	2716			

三、常用不锈钢、耐热钢的化学成分和中外钢号对照

钢号 中国 GB	化学成分 (质量分数, %)											国外钢号对照				
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	其他	日本 JIS	美国 ASTM	德国 W-Nr	法国 NF	英国 BS	瑞典 SIS		
12Cr18Mn8Ni5N	0.15	1.00	7.50~ 10.00	17.00~ 19.00		4.00~ 6.00		N: 0.05~ 0.25	SUS302	202			284S16			
12Cr18Ni9	0.15	1.00	2.00	17.00~ 19.00		8.00~ 10.50			SUS302	302	1.4300	Z10CN18.09	302S25			
1Cr18Ni9Ti	≤0.12	≤1.00	≤2.00	17.00~ 19.00		8.00~ 11.00		Ti: (C%~ 0.02)~0.8	SUS321	321	1.4878	Z6CNT18.12	321S20	2337		
06Cr25Ni20 (1Cr25Ni20Si2)	0.08	1.00	2.00	24.00~ 26.00		19.00~ 22.00			SUS310S	310S	1.4845	Z12CNS 25.20	304S24	2361		
06Cr15Ni25MnNb	0.08	1.00	2.00	13.50~ 16.00	1.00~ 1.50	24.00~ 27.00	0.10~ 0.50	Ti: 1.90 ~2.35 Al: 0.35 B: 0.001~ 0.010	SUH660	660	1.4980	Z6NCTDV 25.15	286S31			
06Cr17Ni12Mo2	0.08	1.00	2.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00	10.00~ 14.00			SUS316	316	1.4401	Z6CNDI7.11	316S16	2347		
53Cr21Mn9Ni4N	0.48~0.58	0.35	8.00~ 10.00	20.00~ 22.00		3.25~4.50		N: 0.35 ~0.50	SUH35	(SAE)	1.4871	Z52CMN 21.09	349S32			
16Cr23Ni13	0.20	1.00	2.00	22.00~ 24.00		12.00~ 15.00			SUH309	309	1.4828	215CNS 20.12	309S24			
10Cr17	0.12	1.00	1.00	16.00~ 18.00		(0.60)			SUS430	430	1.4016	Z8C17	430S15	2320		
18Cr12MoVNbN	0.15~0.20	0.50	0.50~1.00	10.00~ 13.00	0.30~0.90	(0.60)	0.1~0.4	Nb: 0.20 ~0.60	SUH600			Z20CND6V11				
22Cr12NiWMoV	0.20~0.25	0.50	0.50~1.00	11.00~ 13.00	0.75~1.25	0.50~1.00	0.20~0.40	W: 0.70 ~1.25	SUH616	616	1.4935					

(续表)

钢号 中国GB	化学成分 (质量分数, %)										国外牌号对照				
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	其他	日本JIS	美国ASTM	德国W-Nr	法国NF	英国BS	瑞典SS	
12Cr13	0.15	1.00	1.00	11.50~ 13.50		(0.60)			SUS410	410	1.4006	Z12C13	410S21	2302	
20Cr13	0.16~0.25	1.00	1.00	12.00~ 14.00		(0.60)			SUS420J1	420	1.4021	Z20C13	420S37	2303	
30Cr13	0.26~0.35	1.00	1.00	12.00~ 14.00		(0.60)			SUS420J2		1.4028	Z30C13	420S45	2304	
108Cr17	0.95~1.20	1.00	1.00	16.00~ 18.00	(0.75)	(0.60)			SUS440C	440C					
07Cr15Ni7Mn2Al	0.09	1.00	1.00	14.00~ 16.00	2.00~3.00	6.50~7.75		Al: 0.75 ~1.50	SUS332	632	1.4532	Z8CND4 17.07			

#### 四、常用铸铁的化学成分和中外牌号对照

牌号 中国GB	化学成分 (质量分数, %)										国外牌号对照				
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	RE	其他	日本JIS	美国AWS	德国W-Nr	法国NF	英国BS	瑞典SS	
HT150	3.2~ 3.5	1.5~ 1.8	0.8~ 1.0						FC150	No. 25	0.6015	EN- GJL-150	Grade150	0115-00	
HT250	2.9~ 3.2	1.3~ 1.6	0.9~ 1.1						FC250	No. 35 No. 40	0.6025	EN- GJL-250	Grade260	0125-00	
HT350	2.8~ 3.1	1.2~ 1.5	1.0~ 1.3						FC350	No. 50	0.6035	EN- GJL-350	Grade350	0135-00	
QT400-15	3.5~ 3.6	3.0~ 3.2	<0.5				0.02	Mg: 0.04	FC400-15		0.7040	EN-GJS -400-15	370/17	0717-02	
QT450-10	3.4~ 3.9	2.7~ 3.0	0.2~ 0.5				0.03~ 0.10	Mg: 0.06~ 0.10	FC450-10	65-45-12		EN-GJS -450-10	450/10		

(续表)

牌号 中国 GB	化学成分 (质量分数, %)											国外牌号对照				
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	RE	其他	日本 JIS	美国 AWS	德国 W-Nr	法国 NF	英国 BS	瑞典 SIS		
QT500-7	3.6~ 3.8	2.5~ 2.9	<0.6				0.03~ 0.06	Mg: 0.03 ~0.05	FCD500-7	80-55-06	0.7050	EN-GJS -500-7	500/7	0727-02		
QT600-3	3.6~ 3.8	2.0~ 2.4	0.5~ 0.7				0.025~ 0.045	Mg: 0.035 ~0.05	FCD600-3	≈80-55 -06 ≈100-70 -03	0.7060	EN-GJS -600-3	600/3	0733-03		
QT700-2	3.7~ 4.0	2.3~ 2.6	0.5~ 0.8		0.15~ 0.4	Cu: 0.4~ 0.8	0.035~ 0.065	Mg: 0.035 ~0.065	FCD700-2	100-70-03	0.7070	EN-GJS -700-2	700/2	0737-01		
QT800-2	3.7~ 4.0	2.5	<0.5		0.39	Cu: 0.82			FCD800-2	120-90-02	0.7080	EN-GJS -800-2	800/2			
KTH350-10	2.5~ 2.7	1.3~ 1.6	0.35~ 0.5					Al: 0.008 B: 0.06	FCM35-10	320510		EN-GJMB -350-10	B35/12			
KTZ450-06	2.4~ 2.6	1.3~ 1.5	0.4~ 0.8						FOMP45-06 FOMP44-06	45006 45008	0.8145	EN-GJMB -450-6	P45/06			
KTZ550-04	2.4~ 2.6	1.3~ 1.5	0.4~ 0.8						FOMP55-04	60004	0.8155	EN-GJMB -550-40	P55/04			
KTZ650-02	2.4~ 2.8	1.3~ 1.5	0.4~ 0.5					B: 0.003 B: 0.01 Cu: 1.0	FOMP65-02	80002	0.8165	EN-GJMB -650-2	P65/02			
KmTFCr15Mn2 -DT	2.7~ 3.2	0.3~ 0.8	0.3~ 0.8	2.0~ 3.0	0~ 1.0	3.0~ 5.0				ASTM F80-Cr-LC	0.9620	F80Cr2B	Grade2A			
KmTFCr15Mn2 -GT	2.0~ 2.8	≤1.0	0.5~ 1.0	13.0~ 18.0	0.5~ 2.5	0~ 1.0		Cu: 0~ 1.2		ASTM F80Cr-Mn-H	0.9635		Grade3B			
KmTFCr9Ni5Si2	2.5~ 3.6	1.5~ 2.2	0.3~ 0.8	8.0~ 10.0	0~ 1.0	4.5~ 6.5				ASTM IDN-HCr	0.9630	F80Cr9Ni5	Grade2D Grade2E			



## 附录五 不锈钢、耐热钢新旧牌号对照

序号	统一数字代号	新 牌 号	旧 牌 号	序号	统一数字代号	新 牌 号	旧 牌 号
1	S35350	12Cr17Mn6Ni5N	1Cr17Mn6NiN	33	S31010	14Cr23Ni18	1Cr23Ni18
2	S39950	10Cr17Mn9Ni4N		34	S31020	20Cr25Ni20	0Cr25Ni20
3	S35450	12Cr18Mn9Ni5N	1Cr18Mn8Ni5N	35	S31008	06Cr25Ni20	2Cr25Ni20
4	S35020	20Cr13Mn9Ni4	2Cr13Mn9Ni4	36	S31053	022Cr25Ni22Mo2N	
5	S35550	20Cr15Mn15Ni2N	2Cr15Mn15Ni2N	37	S31252	015Cr20Ni18Mo6CuN	
6	S35650	53Cr21Mn9Ni4N	5Cr21Mn9Ni4N	38	S31608	06Cr17Ni12Mo2	0Cr17Ni12Mo2
7	S35750	26Cr18Mn12Si2N	3Cr18Mn12Si2N	39	S31603	022Cr17Ni12Mo2	00Cr17Ni14Mo2
8	S35850	22Cr20Mn10Ni2Si2N	2Cr20Mn9Ni2Si2N	40	S31609	07Cr17Ni12Mo2	1Cr17Ni12Mo2
9	S30110	12Cr17Ni7	1Cr17Ni7	41	S31668	06Cr17Ni12Mo2Ti	0Cr18Ni12Mo2Ti
10	S30103	022Cr17Ni7		42	S31678	06Cr17Ni12Mo2Nb	
11	S30153	022Cr17Ni7N		43	S31658	06Cr17Ni12Mo2N	017Ni12Mo2N
12	S30220	17Cr18Ni9	2Cr18Ni9	44	S31653	022Cr17Ni12Mo2N	00Cr17Ni13Mo2N
13	S30210	12Cr18Ni9	1Cr18Ni9	45	S31688	06Cr18Ni12Mo2Cu2	0Cr18Ni12Mo2Cu2
14	S30240	12Cr18Ni9Si3	1Cr18Ni9Si3	46	S31683	022Cr18Ni14Mo2Cu2	00Cr18Ni14Mo2Cu2
15	S30317	Y12Cr18Ni9	Y1Cr18Ni9	47	S31693	022Cr18Ni15Mo3N	00Cr18Ni15Mo3N
16	S30327	Y12Cr19Ni9Se	Y1Cr19Ni9Se	48	S31782	015Cr21Ni26Mo5Cu2	
17	S30408	06Cr19Ni10	0Cr18Ni9	49	S31708	06Cr19Ni13Mo3	0Cr19Ni13Mo3
18	S30403	022Cr19Ni10	00Cr19Ni10	50	S31703	022Cr19Ni13Mo3	00Cr19Ni13Mo3
19	S30409	07Cr19Ni10		51	S31793	022Cr18Ni14Mo3	00Cr18Ni14Mo3
20	S30450	05Cr19Ni10Si2CeN		52	S31794	03Cr18Ni16Mo5	0Cr18Ni16Mo5
21	S30480	06Cr18Ni9Cu2	0Cr18Ni9Cu2	53	S31723	022Cr19Ni16Mo5N	
22	S30488	06Cr18Ni9Cu3	0Cr18Ni9Cu3	54	S31753	022Cr19Ni13Mo4N	
23	S30458	06Cr19Ni10N	0Cr19Ni9N	55	S32168	06Cr18Ni11Ti	0Cr18Ni10Ti
24	S30478	06Cr19Ni9NbN	0Cr19Ni10NbN	56	S32169	07Cr19Ni11Ti	1Cr18Ni11Ti
25	S30453	022Cr19Ni10N	00Cr18Ni10N	57	S32590	45Cr14Ni14W2Mo	4Cr14Ni14W2Mo
26	S30510	10Cr18Ni12	1Cr18Ni12	58	S32652	015Cr24Ni22Mo8Mn3CuN	
27	S30508	06Cr18Ni12	0Cr18Ni12	59	S32720	24Cr18Ni8W2	2Cr18Ni8W2
28	S38408	06Cr16Ni18	0Cr16Ni18	60	S33010	12Cr16Ni35	1Cr16Ni35
29	S30808	06Cr20Ni11		61	S34553	022Cr24Ni17Mo5Mn6NbN	
30	S30850	22Cr21Ni12N	2Cr21Ni12N	62	S34778	06Cr18Ni11Nb	0Cr18Ni11Nb
31	S30920	16Cr23Ni13	2Cr23Ni13	63	S34779	07Cr18Ni11Nb	1Cr19Ni11Nb
32	S30908	06Cr23Ni13	0Cr23Ni13	64	S38148	06Cr18Ni13Si4	0Cr18Ni13Si4

(续表)

序号	统一数字代号	新 牌 号	旧 牌 号	序号	统一数字代号	新 牌 号	旧 牌 号
65	S38240	16Cr20Ni14Si2	1Cr20Ni14Si2	100	S41617	Y12Cr13	Y1Cr13
66	S38340	16Cr25Ni20Si2	1Cr25Ni20Si2	101	S42020	20Cr13	2Cr13
67	S21860	14Cr18Ni11Si4AlTi	1Cr18Ni11Si4AlTi	102	S42030	30Cr13	3Cr13
68	S21953	022Cr19Ni5Mo3Si2N	00Cr18Ni5Mo3Si2	103	S42037	Y30Cr13	Y3Cr13
69	S22160	12Cr21Ni5Ti	1Cr21Ni5Ti	104	S42040	40Cr13	4Cr13
70	S22253	022Cr22Ni5Mo3N		105	S41427	Y25Cr13Ni2	Y2Cr13Ni2
71	S22053	022Cr23Ni5Mo3N		106	S43110	14Cr17Ni2	1Cr17Ni2
72	S23043	022Cr23Ni4MoCuN		107	S43120	17Cr16Ni2	
73	S22553	022Cr25Ni6Mo2N		108	S44070	68Cr17	7Cr17
74	S22583	022Cr25Ni7Mo3WCuN		109	S44080	85Cr17	8Cr17
75	S25554	03Cr25Ni6Mo3Cu2N		110	S44096	108Cr17	11Cr17
76	S25073	022Cr25Ni7Mo4N		111	S44097	Y108Cr17	Y11Cr17
77	S27603	022Cr25Ni7Mo4WCuN		112	S44090	95Cr18	9Cr18
78	S11348	06Cr13Al	0Cr13Al	113	S45110	12Cr5Mo	1Cr5Mo
79	S11168	06Cr11Ti	0Cr11Ti	114	S45610	12Cr12Mo	1Cr12Mo
80	S11163	022Cr11Ti		115	S45710	13Cr13Mo	1Cr13Mo
81	S11173	022Cr11NbTi		116	S45830	32Cr13Mo	3Cr13Mo
82	S11213	022Cr12Ni		117	S45990	102Cr17Mo	9Cr18Mo
83	S11203	022Cr12	00Cr12	118	S46990	90Cr18MoV	9Cr18MoV
84	S11510	10Cr15	1Cr15	119	S46010	14Cr11MoV	1Cr11MoV
85	S11710	10Cr17	1Cr17	120	S46110	158Cr12MoV	1Cr12MoV
86	S11717	Y10Cr17	Y1Cr17	121	S46020	21Cr12MoV	2Cr12MoV
87	S11863	022Cr18Ti	00Cr17	122	S46250	18Cr12MoVNbN	2Cr12MoVNbN
88	S11790	10Cr17Mo	1Cr17Mo	123	S47010	15Cr12WMoV	1Cr12WMoV
89	S11770	10Cr17MoNb		124	S47220	22Cr12NiWMoV	2Cr12NiWMoV
90	S11862	019Cr18MoTi		125	S47310	13Cr11Ni2W2MoV	1Cr11Ni2W2MoV
91	S11873	022Cr18NbTi		126	S47410	14Cr12Ni2WMoVNb	1Cr12Ni2WMoVNb
92	S11972	019Cr19Mo2NbTi	00Cr18Mo2	127	S47250	10Cr12Ni3Mo2VN	1Cr12Ni3Mo2VN
93	S12550	16Cr25N	2Cr25N	128	S47450	18Cr11NiMoNbVN	2Cr11NiMoNbVN
94	S12791	008Cr27Mo	00Cr27Mo	129	S47710	13Cr14Ni3W2VB	1Cr14Ni3W2VB
95	S13091	008Cr30Mo2	00Cr30Mo2	130	S48040	42Cr9Si2	4Cr9Si2
96	S40310	12Cr12	1Cr12	131	S48045	45Cr9Si3	
97	S41008	06Cr13	0Cr13	132	S48140	40Cr10Si2Mo	4Cr10Si2Mo
98	S41010	12Cr13	1Cr13	133	S48380	80Cr20Si2Ni	8Cr20Si2Ni
99	S41595	04Cr13Ni5Mo		134	S51380	04Cr13Ni8Mo2Al	

(续表)

序号	统一数字代号	新 牌 号	旧 牌 号	序号	统一数字代号	新 牌 号	旧 牌 号
135	S51290	022Cr12Ni9Cu2NbTi		140	S51240	07Cr12Ni4Mn5Mo3Al	0Cr12Ni4Mn5Mo3Al
136	S51550	05Cr15Ni5Cu4Nb		141	S51750	09Cr17Ni5Mo3N	
137	S51740	05Cr17Ni4Cu4Nb	0Cr17Ni4Cu4Nb	142	S51778	06Cr17Ni7AlTi	
138	S51770	07Cr17Ni7Al	0Cr17Ni7Al	143	S51525	06Cr15Ni25Ti2MoAlVB	
139	S51570	07Cr15Ni7Mo2Al	0Cr15Ni7Mo2Al				

## 附录六 铸造形变铝、铜、钛、镁合金 中外牌号对照

### 一、铸造铝合金的中外牌号对照

中国 GB		俄罗斯 ГОСТ	美国 ASTM	日本 JIS	德国 DIN	英国 BS	法国 NF
合金牌号	合金代号						
ZAlSi7Mg	ZL101	AJ19	A03560	AC4C	G - AlSi7Mg	LM25	A - S7G
ZAlSi7MgA	ZL101A	AJ19 - 1	A13560	AC4CH	G - AlSi7Mg		A - S7G03
ZAlSi12	ZL102	AJ19 - 2	A04130	AC3A	G - AlSi12	LM6	A - S13
ZAlSi9Mg	ZL104	AJ14	A03600	AC1A	G - AlSi10Mg	LM9	A - S9G
ZAlSi5Cu1Mg	ZL105	AJ15	A03550	AC4D	G - AlSi5(Cu)	LM16	—
ZAlSi5Cu1MgA	ZL105A	AJ15 - 1	A33550	—	—	—	—
ZAlSi8Cu1Mg	ZL106	AJ132	A03280	—	G - AlSi8Cu3	LM27	—
ZAlSi7Cu4	ZL107	—	A03190	AC2B	G - AlSi6Cu4	LM21	—
ZAlSi12Cu2Mg1	ZL108	AJ125	A23320	—	G - AlSi12Cu	—	—
ZAlSi12Cu1Mg1Ni1	ZL109	AJ130	A13320	AC8A	—	LM13	A - S12UNG
ZAlSi5Cu6Mg	ZL110	—	—	—	—	—	—
ZAlSi9Cu2Mg	ZL111	—	A03540	—	G - AlSi8Cu3	—	—
ZAlSi7Mg1A	ZL114	—	A13570	—	—	—	A - S7G06
ZAlSi5Zn1Mg	ZL115	—	—	—	—	—	—
ZAlSi8MgBe	ZL116	AJ134	—	—	—	—	—
ZAlCu5Mn	ZL201	AJ119	—	—	—	—	—
ZAlCu5MnA	ZL201A	—	—	—	—	—	—
ZAlCu4	ZL203	AJ17	A02950	AC1A	G - AlCu4Ti	—	—
ZAlCu5MnCdA	ZL204A	—	—	—	—	—	—
ZAlCu5MnCdVA	ZL205A	—	—	—	—	—	—
ZAlRE5Cu3Si2	ZL207	ALP - 1	—	—	—	—	—

(续表)

中国 GB		俄罗斯 ГОСТ	美国 ASTM	日本 JIS	德国 DIN	英国 BS	法国 NF
合金牌号	合金代号						
ZAlMg10	ZL301	АЛ8	A05200	AC7B	G - AlMg10	LM10	—
ZAlMg5Si1	ZL303	АЛ13	A25140	—	G - AlMg5Si	LM5	—
ZAlMg8Zn1	ZL305	—	—	—	—	—	—
ZAlZn11Si7	ZL401	АЛ11	—	—	—	—	—
ZAlZn6Mg	ZL402	—	A07120	—	—	—	A - Z5G

## 二、变形铝及铝合金的中外牌号对照

中国 GB		俄罗斯 ГОСТ	美国 AA	日本 JIS	德国 DIN	英国 BS	法国 NF
新牌号	旧牌号						
1A99	LG5	AB000	1195	1N99	Al99.98R	S1	—
1A90	LG2	AB1	1090	1N90	Al99.9	—	—
1A85	LG1	AB2	1080	A1080	Al99.8	1A	—
1070A	L1	A00	1070	A1070	Al99.7	—	1070A
1060	L2	A0	1060	A1060	—	—	—
1050A	L3	A1	1050	—	Al99.5	1B	1050A
1100	L5-1	A2	1100	A1100	Al99.0	3L54	1100
1200	L5	—	1200	A1200	Al99	1C	1200
5A02	LF2	AMГ2	5052	A5052	AlMg2.5	N4	5052
5A03	LF3	AMГ3	5154	A5154	AlMg3	N5	—
5083	LF4	AMГ4	5083	A5083	AlMg4.5Mn	N8	5083
5056	LF5-1	—	5056	A5056	AlMg5	N6	—
5A05	LF5	AMГ5	5456	—	—	N61	—
3A21	LF21	AMЦ	3003	A3003	AlMnCu	N3	3003
6A02	LD2	AB	6165	A6165	—	—	—
2A70	LD7	AK4	2618	2N01	—	H16	2618A
2A99	LD9	AK2	2018	A2018	—	—	—
2A14	LD10	AK8	2014	A2014	AlCuSiMn	—	2014
4A11	LD11	AK9	4032	A4032	—	38S	4032
6061	LD30	AD33	6061	A6061	AlMg1SiCu	H20	6061
6063	LD31	AD31	6063	A6063	AlMgSi0.5	H19	6061
2A01	LY1	Д18	2217	A2217	AlCu2.5Mg0.5	3L86	—
2A11	LY11	Д1	2017	A2017	AlCuMg1	H15	2017A
2A12	LY12	Д16	2024	A2024	AlCuMg2	GB-24S	2024

(续表)

中国 GB		俄罗斯 ГОСТ	美国 AA	日本 JIS	德国 DIN	英国 BS	法国 NF
新牌号	旧牌号						
7A03	LC3	B94	7141	—	—	—	—
7A09	LC9	—	7075	A7075	AlZnMgCu1.5	1.95	7075
7A10	LC10	—	7079	7N11	AlZnMgCu0.5	—	—
4A04	LT1	AK	4043	A4043	AlSi5	N21	—
4A17	LT17	—	4047	A4047	AlSi12	N2	—
7A01	LB1	—	7072	A7072	AlZn1	—	—

## 三、铜合金的中外牌号对照

中国 GB(YB)	俄罗斯 ГОСТ	美国 ASTM	英国 BS	德国 DIN	日本 JIS
T1 T2 T3 T4	M0 M1 M2 M3				
TU1 TU2	Mσ1 Mσ2	101 102	C103		EOFCUP OF - CUP
H96 H90 H80 H70 H68 H62	Л96 Л90 Л80 Л70 Л68	210 220 240 260 268 272、274	CZ101 CZ103 CZ106 CZ108	MS90 MS80 MS70 MS63	RBS1 RBS2 RBS4 BSP1 BSP2B
QSn4-3 QSn4-4-4 QSn6.5-0.1 QSn6.5-0.4 QSn7-0.2	БРОЦ4-3 БРОЦ4-4-4 БРОФ6.5-0.15 БРОФ6.5-0.4 БРОФ7-0.2	B139BZ B139、B159 519	407-3	MSnBZ4 MSnBZ4Pb SnBZ6	BC6 PBB2
QA15 QA17 QA19-2 QA110-3-1.5 QA110-4-4	БРА5 БРА7 БРАМЦ9-1 БРАЖМЦ10-3-1.5 БРАЖН10-4-4	B169BZ B169B AMS1640	2033	NiAlBZ	ABI AB5
QBe2 QBe1.9 QBe1.7	БР2 БРБНТ1.9 БРБНТ1.7	172 170			BeCu2 BeCu1
QSi3-1 QCd1.0 QCd0.5	БРКМЦ3-1 БРКД1.0 БРХ0.5	B98-D	1948		
B19 BMn3-12 BFe30-1-1 BZn15-20	MН19 MНМЦ3-12 MНЖМВ30-0.8-1 MНЦ15-20	B171 715 B206-D	B372-2 CN106	CuNi20	CNTF3

## 四、镁合金的中外牌号对照

合金类型	中国 GB(YB)	俄罗斯 ГОСТ	美国 AA, ASTM	英国 BS	德国 DIN	日本 JIS
铸造镁合金	ZM1	MJI12	ZK51A	ZL127		
	ZM2		ZE41A	ZL128		
	ZM3	MJI11				
	ZM5	MJI15	AZ81A	3L122		
变形镁合金	MB1		AIM1A	DTD737		
				DTD142		
				DTD118		
				AM503		
	MB2	MA2	AZ31C	MAG111	MgAl <sub>3</sub> Zn	M1
	MB3	MA2-1				
	MB5	MA3	AZ61A	MAG121	MgAl <sub>6</sub> Zn	M2
	MB6	MA4				
	MB7	MA5	AZ80X	88B	MgAl <sub>7</sub> Zn	AZ61A
	MB8	MA8				AZ80A
	MB15	BM65-1	AK60A	DTD5031		AK60A
				DTD5041		

## 五、钛合金的中外牌号对照

合金类型	中国 GB(YB)	俄罗斯 ГОСТ	美国 ASTM	英国 IMI	德国 BWB	法国 NF	日本 JIS
工业纯钛	TA1	BT1-0	Ti-35A	IMI115	LW3.7024	T-35	KS50
	TA2	BT1-1	Ti-50A	IMI125	LW3.7034	T-40	KS60
	TA3	BT1-2	Ti-65A	IMI135	—	—	KS80
α钛合金	TA4	48-T2	—	—	—	—	—
	TA5	48-OT3	—	—	—	—	—
	TA6	BT5	—	—	—	—	KS115AS
	TA7	BT5-1	Ti-5Al-2.5Sn	IMI317	—	TA5E	—
	TA8	BT10	—	—	—	—	—
β钛合金	TB2	BT15	—	—	—	—	—
(α+β)钛合金	TC1	OT4-1	—	IMI315	—	—	5T-A90
	TC2	OT4	—	—	—	—	—
	TC3	BT6C	—	—	—	—	—
	TC4	BT6	Ti-6Al-4V	IMI318	LW3.7164	TA6V	—
	TC6	BT3-1	—	—	—	—	—

(续表)

合金类型	中国 GB(YB)	俄罗斯 ГОСТ	美国 ASTM	英国 IMI	德国 BWB	法国 NF	日本 JIS
(α+β)钛合金	TC7	AT6	—	—	—	—	—
	TC9	—	—	—	—	—	—
	TC10	—	Ti-6Al-6V-2Sn	—	—	TA6V6Sn2	—

## 附录七 洛氏、表面洛氏、肖氏与布氏、 维氏硬度换算对照

### 一、洛氏硬度 HRC 与其他硬度的换算对照(摘自 GB/T1172—1999)

HRC	HRA	HV	HBW	HRC	HRA	HV	HBS
65.0	83.9	822		52.5	77.1	552	544HBW
64.5	83.6	809		52.0	76.9	544	535HBW
64.0	83.3	795		51.5	76.6	535	527HBW
63.5	83.1	782		51.0	76.3	527	518HBW
63.0	82.8	770		50.5	76.1	520	510HBW
62.5	82.5	757		50.0	75.8	512	502HBW
62.0	82.2	745		49.5	75.5	504	494HBW
61.5	82.0	733		49.0	75.3	497	486HBW
61.0	81.7	721		48.5	75.0	489	478HBW
60.5	81.4	710	650	48.0	74.8	482	470HBW
60.0	81.2	698	647	47.5	74.5	475	463HBW
59.5	80.9	687	643	47.0	74.2	468	449
59.0	80.6	676	639	46.5	73.9	461	442
58.5	80.3	666	634	46.0	73.7	454	436
58.0	80.1	655	628	45.5	73.4	448	430
57.5	79.8	645	622	45.0	73.2	441	424
57.0	79.5	635	616	44.5	72.9	435	418
56.5	79.3	625	608	44.0	72.6	428	413
56.0	79.0	615	601	43.5	72.4	422	407
55.5	78.7	606	593	43.0	72.1	416	401
55.0	78.5	596	585	42.5	71.8	410	396
54.5	78.1	587	577	42.0	71.6	404	391
54.0	77.9	578	569	41.5	71.4	398	385
53.5	77.7	569	561	41.0	71.1	393	380
53.0	77.4	561	552	40.5	70.8	387	375

(续表)

HRC	HRA	HV	HBS	HRC	HRA	HV	HBS
40.0	70.5	381	370	29.5		284	280
39.5	70.3	376	365	29.0		280	276
39.0	70.0	371	360	28.5		276	273
38.5		365	355	28.0		273	269
38.0		360	350	27.5		269	266
37.5		355	345	27.0		266	263
37.0		350	341	26.5		262	260
36.5		345	336	26.0		259	257
36.0		340	332	25.5		256	254
35.5		334	327	25.0		253	251
35.0		331	323	24.5		250	248
34.5		326	318	24.0		247	245
34.0		321	314	23.5		244	242
33.5		317	310	23.0		241	240
33.0		313	306	22.5		238	237
32.5		308	302	22.0		235	234
32.0		304	298	21.5		233	232
31.5		300	294	21.0		230	229
31.0		296	291	20.5		228	227
30.5		292	287	20.0		226	225
30.0		288	283				

二、黑色金属各种硬度之间的换算

硬 度						
洛 氏		表 面 洛 氏			维 氏	布 氏
HRC	HRA	HR15N	HR30N	HR45N	HV	HB
20.0	60.2	68.8	40.7	19.2	226	225
21.0	60.7	69.3	41.7	20.4	230	229
22.0	61.2	69.8	42.6	21.5	235	234
23.0	61.7	70.3	43.6	22.7	241	240
24.0	62.2	70.8	44.5	23.9	247	245
25.0	62.8	71.4	45.5	25.1	253	251
26.0	63.3	71.9	46.4	26.3	259	257
27.0	63.8	72.4	47.3	27.5	266	263
28.0	64.3	73.0	48.3	28.7	273	269



(续表)

硬 度						
洛 氏		表 面 洛 氏			维 氏	布 氏
HRC	HRA	HR15N	HR30N	HR45N	HV	HB
29.0	64.8	73.5	49.2	29.9	280	276
30.0	65.3	74.1	50.2	31.1	288	283
31.0	65.8	74.7	51.1	32.3	296	291
32.0	66.4	75.2	52.0	33.5	304	298
33.0	66.9	75.8	53.0	34.7	313	306
34.0	67.4	76.4	53.9	35.9	321	314
35.0	67.9	77.0	54.8	37.0	331	323
36.0	68.4	77.5	55.8	38.2	340	332
37.0	69.0	78.1	56.7	39.4	350	341
38.0	69.5	78.7	57.6	40.6	360	350
39.0	70.0	79.3	58.6	41.8	371	360
40.0	70.5	79.9	59.5	43.0	381	370
41.0	71.1	80.5	60.4	44.2	393	381
42.0	71.6	81.1	61.3	45.4	404	392
43.0	72.1	81.7	62.3	46.5	416	403
44.0	72.6	82.3	63.2	47.7	428	415
45.0	73.2	82.9	64.1	48.9	441	428
46.0	73.7	83.5	65.0	50.1	454	441
47.0	74.2	84.0	65.9	51.2	468	455
48.0	74.7	84.6	66.8	52.4	482	470
49.0	75.3	85.2	67.7	53.6	497	486
50.0	75.8	85.7	68.6	54.7	512	502
51.0	76.3	86.3	69.5	55.9	527	518
52.0	76.9	86.8	70.4	57.1	544	535
53.0	77.4	87.4	71.3	58.2	561	552
54.0	77.9	87.9	72.2	59.4	578	569
55.0	78.5	88.4	73.1	60.5	596	585
56.0	79.0	88.9	73.9	61.7	615	601
57.0	79.5	89.4	74.8	62.8	635	616
58.0	80.1	89.8	75.6	63.9	655	628
59.0	80.6	90.2	76.5	65.1	676	639
60.0	81.2	90.6	77.3	66.2	698	647
61.0	81.7	91.0	78.1	67.3	721	

(续表)

硬 度						
洛 氏		表 面 洛 氏			维 氏	布 氏
HRC	HRA	HR15N	HR30N	HR45N	HV	HB
62.0	82.2	91.4	79.0	68.4	745	
63.0	82.8	91.7	79.8	69.5	770	
64.0	83.3	91.9	80.6	70.6	795	
65.0	83.9	92.2	81.3	71.7	822	
66.0	84.4				850	
67.0	85.0				879	
68.0	85.5				909	

## 三、肖氏硬度与洛氏、布氏、维氏硬度的换算

肖 氏 HS	洛 氏		布 氏 HB30D <sup>2</sup>	维 氏 HV
	HRC	HRA		
48.0	36.2	68.5	333	339
49.0	37.1	69.0	341	348
50.0	38.0	69.5	350	356
51.0	38.8	69.9	358	365
52.0	39.7	70.4	366	373
53.0	40.5	70.8	375	382
54.0	41.3	71.2	383	391
55.0	42.1	71.6	391	400
56.0	42.8	72.0	400	409
57.0	43.6	72.4	408	418
58.0	44.4	72.8	417	428
59.0	45.1	73.2	426	437
60.0	45.8	73.6	434	447
61.0	46.6	74.0	443	452
62.0	47.3	74.3	452	467
63.0	48.0	74.7	461	477
64.0	48.7	75.1	470	488
65.0	49.4	75.5	479	498
66.0	50.0	75.8	488	509
67.0	50.7	76.2	498	521
68.0	51.4	76.5		532
69.0	52.1	76.9		544
70.0	52.7	77.3		556
71.0	53.4	77.6		568
72.0	54.0	78.0		580

(续表)

肖氏 HS	洛氏		布氏 HB30D <sup>2</sup>	维氏 HV
	HRC	HRA		
73.0	54.7	78.3		593
74.0	55.3	78.6		606
75.0	56.0	79.0		620
76.0	56.6	79.3		633
77.0	57.2	79.7		647
78.0	57.9	80.0		661
79.0	58.5	80.3		676
80.0	59.1	80.7		691
81.0	59.7	81.0		706
82.0	60.3	81.3		721
83.0	60.9	81.6		737
84.0	61.5	82.0		752
85.0	62.1	82.3		768
86.0	62.6	82.6		785
87.0	63.2	82.9		801
88.0	63.8	83.2		818
89.0	64.3	83.5		834
90.0	64.8	83.8		851
91.0	65.4	84.1		868
92.0	65.9	84.3		885
93.0	66.4	84.6		902
94.0	66.9	84.9		919

注：本表系采用肖氏硬度基准机和洛氏硬度基准机进行硬度对比试验后，将数据数学归纳做出 HS - HRC 硬度换算表，再与 GB1172 联用得到。

## 附录八 调质、轴类、套类及不同钢材套类零件 热处理时需预留的加工余量

### 一、调质件的加工余量

直径 (mm)	长度(mm)			
	<500	500~1 000	>1 000~1 800	>1 800
10~20	2~2.5	2.5~3.0	—	—
22~45	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	—
48~70	2.5~3.0	3.0~3.5	4.0~4.5	5.0~6.5
75~100	3.0~3.5	3.0~3.5	5.0~5.5	6.0~7.0

## 二、轴类零件热处理时外圆预留的磨削余量

直径 (mm)	长 度(mm)										
	≤50	51~ 100	101~ 200	201~ 300	301~ 450	451~ 600	601~ 800	801~ 1 000	1 001~ 1 300	1 301~ 1 600	1 601~ 2 000
≤5	0.35~ 0.45	0.45~ 0.55	0.55~ 0.65								
6~ 10	0.30~ 0.40	0.40~ 0.50	0.50~ 0.60	0.55~ 0.65							
11~ 20	0.25~ 0.35	0.30~ 0.40	0.40~ 0.50	0.50~ 0.60	0.55~ 0.65						
21~ 30	0.30~ 0.40	0.30~ 0.40	0.35~ 0.45	0.40~ 0.50	0.45~ 0.55	0.50~ 0.60	0.55~ 0.65				
31~ 50	0.35~ 0.45	0.35~ 0.45	0.35~ 0.45	0.35~ 0.45	0.40~ 0.50	0.45~ 0.55	0.50~ 0.60	0.60~ 0.65	0.75~ 0.80		
51~ 80	0.40~ 0.50	0.40~ 0.50	0.40~ 0.50	0.40~ 0.50	0.40~ 0.50	0.40~ 0.50	0.50~ 0.60	0.60~ 0.65	0.75~ 0.80	0.80~ 0.95	0.95~ 1.20
81~ 120	0.50~ 0.60	0.50~ 0.60	0.50~ 0.60	0.50~ 0.60	0.50~ 0.60	0.50~ 0.60	0.60~ 0.70	0.65~ 0.75	0.75~ 0.80	0.85~ 1.00	1.05~ 1.30
121~ 180	0.60~ 0.70	0.60~ 0.70	0.60~ 0.70	0.60~ 0.70	0.60~ 0.70	0.70~ 0.80	0.70~ 0.80	0.80~ 0.95	0.95~ 1.00	1.00~ 1.20	1.20~ 1.40
181~ 260	0.70~ 0.90	0.70~ 0.90	0.70~ 0.90	0.70~ 0.90							

## 三、套类零件热处理时预留的磨削余量

内孔直径 (mm)	壁 厚 (mm)	套 的 高 度(mm)					
		≤100		101~250		251~500	
		内 孔	外 径	内 孔	外 径	内 孔	外 径
≤30	>5	0.20~0.30	0.40~0.50	0.30~0.40	0.40~0.50	0.40~0.50	0.50~0.60
	≤5	0.30~0.40	0.40~0.50	0.40~0.50	0.50~0.60	0.50~0.60	0.60~0.70
31~50	>5	0.30~0.40	0.40~0.50	0.40~0.50	0.50~0.60	0.50~0.60	0.60~0.70
	≤5	0.40~0.50	0.50~0.60	0.50~0.60	0.60~0.70	0.60~0.70	0.70~0.80
51~80	>6	0.40~0.50	0.50~0.60	0.50~0.60	0.60~0.70	0.50~0.60	0.70~0.80
	≤6	0.50~0.60	0.60~0.70	0.50~0.60	0.60~0.70	0.60~0.70	0.70~0.80
81~120	>12	0.50~0.70	0.60~0.80	0.50~0.60	0.60~0.80	0.60~0.80	0.70~0.90
	>6~12	0.60~0.80	0.70~0.90	0.60~0.80	0.70~0.90	0.70~0.90	0.80~1.00
	≤6	0.70~0.90	0.80~1.00	0.70~0.90	0.80~1.00	0.80~1.00	0.90~1.10
121~180	>14	0.60~0.80	0.70~0.90	0.60~0.80	0.70~0.90	0.70~0.90	0.80~1.00
	>8~14	0.70~0.90	0.80~1.00	0.70~0.90	0.80~1.00	0.80~1.00	0.90~1.10
	≤8	0.80~1.00	0.90~1.10	0.80~1.00	0.90~1.10	0.90~1.10	1.00~1.20

## 四、不同钢材套类零件的预留余量

### 1. 中碳钢内孔预留余量

		(mm)									
孔 径		≤10	11~18	19~30	31~50	51~80	81~120	121~180	181~260	261~360	>360
余 (min)		0.25	0.30	0.25	0.40	0.45	0.50	0.60	0.65	0.85	0.85
量 (max)		0.30	0.35	0.40	0.50	0.70	0.85	1.00	1.10	1.20	1.30

注：壁厚，高度小，取上限值；壁厚，高度大，则取下限值。

### 2. 中碳钢外径及高度预留余量

		(mm)				
外 径	高 度	≤50	51~100	101~200	201~300	301~450
	11~20		0.15~0.25	0.25~0.35	0.35~0.45	0.40~0.50
21~30		0.15~0.25	0.15~0.25	0.20~0.30	0.25~0.35	0.30~0.40
31~50		0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25	0.20~0.30
51~80		0.10~0.20	0.10~0.20	0.10~0.20	0.10~0.20	0.10~0.20
81~120		0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15
121~181		0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15
181~260		0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15	0.05~0.15

### 3. 高碳钢内孔预留余量

		(mm)					
孔 径		≤10	11~18	19~30	31~50	51~80	81~100
余 (min)		0.25	0.20	0.15	0.10	0.05	0.05
量 (max)		0.30	0.25	0.20	0.20	0.15	0.15

注：壁厚，含碳量高，取其下限值；壁厚，含碳量低，取上限值。

### 4. 高碳钢外径及高度预留余量

		(mm)				
外 径	高 度	≤50	51~100	101~200	201~300	301~450
	11~20		0.10~0.20	0.15~0.25	0.20~0.30	—
21~30		0.10~0.20	0.15~0.25	0.20~0.30	—	—
31~50		0.16~0.26	0.20~0.30	0.20~0.30	—	—
51~80		0.20~0.30	0.20~0.30	0.25~0.35	0.30~0.40	—
81~120		0.20~0.30	0.25~0.35	0.30~0.40	0.35~0.45	0.45~0.50

### 5. 渗碳钢内径预留余量

		(mm)									
孔 径		≤10	11~18	19~30	31~50	51~80	81~120	121~180	181~260	261~360	>360
余 (min)		0.15	0.20	0.15	0.10	0.10	0	0	0	0	0
量 (max)		0.15	0.10	0.05	0	0	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10

## 6. 渗碳钢外径及高度预留余量

		(mm)				
外 径	高 度	≤50	51~100	101~200	201~300	301~450
	11~20		0.25~0.30	0.35~0.45	0.45~0.55	0.50~0.60
21~30		0.30~0.40	0.30~0.40	0.35~0.45	0.40~0.45	0.45~0.55
31~50		0.35~0.45	0.35~0.45	0.35~0.45	0.35~0.45	0.40~0.50
51~80		0.40~0.50	0.40~0.50	0.40~0.50	0.40~0.50	0.40~0.50
81~120		0.50~0.60	0.50~0.60	0.50~0.60	0.50~0.60	0.50~0.60
121~180		0.60~0.70	0.60~0.70	0.60~0.70	0.60~0.70	0.60~0.70
181~260		0.70~0.90	0.70~0.90	0.70~0.90	0.70~0.90	—

## 7. 合金钢内径预留余量

		(mm)								
孔 径	≤10	11~18	19~30	31~50	51~80	81~120	121~180	181~260	261~360	>360
	余 (min)	0.15	0.15	0.15	0.15	0.20	0.20	0.20	0.30	0.50
量 (max)	0.20	0.20	0.25	0.25	0.30	0.30	0.35	0.50	0.70	1.30

## 8. 合金钢外径及高度预留余量

		(mm)				
外 径	高 度	≤50	51~100	101~200	201~300	301~450
	11~20		0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25
21~30		0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25
31~50		0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25	0.15~0.25	0.20~0.30
51~80		0.15~0.25	0.20~0.30	0.20~0.30	0.20~0.30	0.20~0.30
81~120		0.20~0.30	0.20~0.30	0.20~0.30	0.20~0.30	0.20~0.30
121~180		0.30~0.40	0.30~0.40	0.30~0.40	0.30~0.40	—
181~260		0.40~0.60	0.40~0.60	0.40~0.60	—	—

## 附录九 常用钢材水、油、分级、等温淬火及按表面至半马氏体组织深度所确定的临界淬火直径

### 一、常用钢材淬火后表面硬度 HRC 与截面厚度或直径的关系

材料及淬火方式	零件截面厚度或直径 (mm)						
	≤3	4~10	11~20	21~30	31~50	51~80	81~120
15(渗碳后),水淬	58~65	58~65	58~65	58~65	58~62	50~60	
15(渗碳后),油淬	58~62	40~60					
20Cr(渗碳后),油淬	60~65	60~65	60~65	60~65	56~62	50~55	40~45

(续表)

材料及淬火方式	零件截面厚度或直径(mm)						
	≤3	4~10	11~20	21~30	31~50	51~80	81~120
35,水淬	45~50	45~50	45~50	35~45	30~40		
35SiMn,油淬	48~53	48~53	48~53	45~50	40~45	35~45	
40Cr,油淬	50~60	50~55	50~55	45~50	40~45	35~45	
45,水淬	54~59	50~53	50~55	48~52	45~50	40~45	25~35
45,油淬	40~45	30~35					
65SiMn,油淬	58~64	58~64	50~60	48~55	45~50	40~45	35~40
T8,水淬	60~65	60~65	60~65	60~65	58~62	45~55	
T8,油淬	55~62						
T10,碱浴	61~64	61~64	61~64	60~62			
GCr15,油淬	60~64	60~64	60~64	58~63	52~62	48~50	
CrWMn,油淬	60~65	60~65	60~65	60~64	58~62	58~62	58~62

## 二、常用钢材在不同介质中淬火及分级淬火时的临界尺寸

(mm)

淬火方法	钢 号					
	45	30CrNiMo	45Mn	5CrMnMo	5CrNiMo	GCr15
分级淬火	2.25	7.25	7.75	22.00	42.50	12.50
普通淬火(油淬)	7.25	12.50	12.5	32.25	57.25	19.75
普通淬火(水淬)	10.00	19.75	19.75	47.50	86.50	32.25

## 三、常用钢材等温淬火的最高硬度和最大有效厚度

钢 号	30CrMnSiA	50CrMnMo	65	65Mn	70MnMo	T10	T10Mn
最高硬度 HRC	~50	~52	53~56	53~56	53~56	57~60	57~60
最大有效厚度(mm)	~15	~13	~5	~6	~16	~4	~5

## 四、按表面至半马氏体组织的深度作为淬透性的判断标准的淬火临界直径

(mm)

序号	钢 号	介 质				序号	钢 号	介 质			
		静油	20℃水	40℃水	20℃ 5%NaCl			静油	20℃水	40℃水	20℃ 5%NaCl
1	15	2	7	5	7	6	40	9	18	15	19
2	20	3	8	6	8	7	45	10	20	16	21.5
3	25	6	13	10	13.5	8	50	10	20	16	21.5
4	30	7	15	12	16	9	55	10	20	16	21.5
5	35	9	18	15	19	10	60	12	24	19.5	25.5

(续表)

序号	钢号	介 质				序号	钢号	介 质			
		静油	20℃水	40℃水	20℃ 5%NaCl			静油	20℃水	40℃水	20℃ 5%NaCl
11	20Mn	15	28	24	29	45	20CrMo	8	17	14	18
12	30Mn	15	28	24	29	46	30CrMo	15	28	24	29
13	40Mn	16	29	25	30	47	35CrMo	25	42	38	43
14	45Mn	17	31	26	32	48	42CrMo	40	58	54.5	59
15	50Mn	17	31	26	32	49	38CrMo	47	69	65	70
16	20Mn2	15	28	24	29	50	25Cr2MoV	35	52	50	54
17	30Mn2	18	33	28	34	51	20CrV	8	17	14	18
18	35Mn2	20	36	31.5	37	52	40CrV	17	31	26	32
19	40Mn2	25	42	38	43	53	45CrV	28	45	41	46
20	45Mn2	25	42	38	43	54	20CrNi	19	34	29	35
21	50Mn2	28	45	41	46	55	40CrNi	24	41	37	42
22	27SiMn	22	38	35	40	56	45CrNi	85	>100	>100	>100
23	35SiMn	25	42	38	43	57	12CrNi2	11	22	18	24
24	42SiMn	25	42	38	43	58	30CrNi3	>100	>100	>100	>100
25	25Mn2V	18	33	28	34	59	12Cr2Ni4	36	56	52	57
26	42Mn2V	25	42	38	43	60	20Cr2Ni4	>100	>100	>100	>100
27	16Cr	10	20	16	21.5	61	40Cr2NiMo	22.5	39	35.5	41
28	15Cr	8	17	14	18	62	45Cr2NiMoV	30	47	43	48
29	20Cr	10	20	16	21.5	63	18Cr2Ni4W	>100	>100	>100	>100
30	30Cr	15	28	24	29	64	40B	10	20	16	21.5
31	35Cr	18	33	28	34	65	45B	10	20	16	21.5
32	40Cr	22	38	35	40	66	40MnB	18	33	28	34
33	45Cr	25	42	38	43	67	45MnB	18	33	28	34
34	50Cr	28	45	41	46	68	20Mn2B	7.5	15	12	16
35	38CrSi	35	52	50	54	69	20MnTiB	15	28	24	29
36	15CrMn	35	52	50	54	70	20MnVB	15	28	24	29
37	20CrMn	50	71	68	74	71	40MnVB	22	38	35	40
38	40CrMn	60	81	74	82	72	20SiMnVB	23	40	36	42
39	30CrMnSi	42.5	62	60	65	73	65	12	24	19.5	26
40	20CrMnSi	15	28	24	29	74	75	13	25	20.5	27
41	30CrMnTi	18	33	28	34	75	85	14	26	22	28
42	15CrMnMo	20	36	31.5	37	76	60Mn	20	36	31.5	37
43	20CrMnMo	25	42	38	43	77	65Mn	20	36	31.5	37
44	40CrMnMo	40	58	54.5	59	78	55Si2Mn	20	36	31.5	37



(续表)

序号	钢号	介质				序号	钢号	介质			
		静油	20℃水	40℃水	20℃ 5%NaCl			静油	20℃水	40℃水	20℃ 5%NaCl
79	60Si2Mn	22	38	35	40	90	9Mn2	33	52	50	54
80	50CrMn	36	56	52	57	91	Mn2V	33	52	50	54
81	50CrVA	32	51	47	52	92	MnSi	20	36	31.5	37
82	50CrMnVA	36	56	52	57	93	6SiMnV	18	33	28	34
83	GCr6	12	24	19.5	25.5	94	5CrMnMoV	15	28	24	29
84	GCr9	13	25	20.5	26	95	9SiCr	32	51	47	52
85	GCr9SiMn	25	42	38	43	96	Cr2	22	38	35	40
86	GCr15	15	28	24	29	97	8Cr2	19	34	29	35
87	GCr15SiMn	29	46	42	47	98	CrV	18	33	28	34
88	T10	14	26	22	28	99	CrW	10	20	16	21.05
89	T12	18	33	28	34	100	9CrWMn2	75	95	90	96

注：上列数据均采用  $L/D \geq 10$ 。

## 附录十 钢的热处理工艺经验公式\*

### 一、热处理相变点的计算

(1) 亚共析钢加热时，所有铁素体转变为奥氏体的温度  $A_{c3}$  (°C)：

$$A_{c3} = 908 - 223.7a_{C} + 438.5a_{P} + 30.49a_{Si} + 37.92a_{V} \\ - 34.43a_{Mn} - 23a_{Ni} - 200(a_{C} - 0.54 + 0.06a_{Ni})$$

适用条件： $0.3\% \leq a_{C} \leq 0.6\%$ ， $0 \leq a_{Si} \leq 1.0\%$ ， $0 \leq a_{Ni} \leq 3.5\%$ ， $0 \leq a_{Cr} \leq 1.5\%$ ， $0 \leq a_{Mo} \leq 3.5\%$ 。

(2) 钢加热时，开始形成奥氏体的温度  $A_{c1}$  (°C)：

$$A_{c1} = 723 + 25a_{Si} - 7a_{Mn} + 15a_{Cr} - 15a_{Ni} + 30a_{W} + 40a_{Mo} + 50a_{V}$$

适用条件： $0 \leq a_{C} \leq 0.8\%$ ， $0 \leq a_{Mo} \leq 0.5\%$ ， $0 \leq a_{V} \leq 0.5\%$ ， $0 \leq a_{W} \leq 1.5\%$ ， $0 \leq a_{Cr} \leq 7.5\%$ 。

(3) 钢奥氏体化后冷却时，奥氏体开始转变为马氏体的温度  $M_s$  (°C)：

$$M_s = 539 - 423a_{C} - 30.4a_{Mn} - 17.7a_{Ni} - 12.1a_{Cr} - 7.5a_{Mo}$$

适用条件  $0.11\% \leq a_{C} \leq 0.6\%$ ， $0.04\% \leq a_{Mn} \leq 4.8\%$ ， $0 \leq a_{Ni} \leq 5.04\%$ ， $0.11\% \leq a_{Si} \leq 1.89\%$ ， $0 \leq a_{Cr} \leq 4.61\%$ ， $0 \leq a_{Mo} \leq 5.41\%$ 。

$$M_s = 561 - 474a_{C} - 33a_{Mn} - 17a_{Cr} - 17a_{Ni} - 21a_{Mo}$$

适用于中、低碳钢。注意：上述  $M_s$  点的计算公式主要用于亚共析钢。

$$M_s = 41.7(14.6 - a_{C}) + 0.6(6.9 - a_{Ni}) + 33(1.33 - a_{Mn})$$

\* 热处理工艺经验公式其误差率  $\leq \pm 10\%$ 。其中，回火回归方程仅适用于常规淬火、回火工艺。

$$+28(0.47-\omega_{Si})+1677(0.068-\omega_{C}-\omega_{N})-17.8$$

适用于 SUS 类(日本)不锈钢。

(4) 奥氏体转变为马氏体的终了温度  $M_f(^{\circ}\text{C})$ ：

$M_f$  点在不同的马氏体含量时的转变量计算公式：

$$M_f(\text{马氏体含量 } 100\%) = M_s - (215 \pm 15)$$

$$M_f(\text{马氏体含量 } 90\%) = M_s - (103 \pm 12)$$

$$M_f(\text{马氏体含量 } 50\%) = M_s - (47 \pm 9)$$

$$M_f(\text{马氏体含量 } 10\%) = M_s - (10 \pm 3)$$

(5) 贝氏体组织开始转变的温度  $B_s(^{\circ}\text{C})$ ：

$$B_s = 830 - 270\omega_{C} - 90\omega_{Mn} - 37\omega_{Ni} - 70\omega_{Cr} - 83\omega_{Mo}$$

## 二、钢的临界冷却速度的计算

(1) 钢在油中淬火时心部得到马氏体的临界冷却速度  $v_M(^{\circ}\text{C}/\text{h})$ ：

$$\lg v_M = 9.81 - 4.62\omega_{C} + 1.1\omega_{Mn} + 0.54\omega_{Ni} + 0.5\omega_{Cr} + 0.6\omega_{Mo} + 0.00183P_A$$

(2) 钢在油中淬火时心部得到贝氏体的临界冷却速度  $v_B(^{\circ}\text{C}/\text{h})$ ：

$$\lg v_B = 10.17 - 3.80\omega_{C} + 1.07\omega_{Mn} + 0.7\omega_{Ni} + 0.57\omega_{Cr} + 1.58\omega_{Mo} + 0.0032P_A$$

(3) 钢在油中淬火时心部得到 50% 马氏体 + 50% 贝氏体的临界冷却速度  $v_{50BM} (^{\circ}\text{C}/\text{h})$ ：

$$\lg v_{50BM} = 8.50 - 4.13\omega_{C} + 0.86\omega_{Mn} + 0.57\omega_{Ni} + 0.41\omega_{Cr} + 0.94\omega_{Mo} + 0.0012P_A$$

(4) 钢在油中淬火时心部得到珠光体—铁素体混合物的临界冷却速度  $v_{PF} (^{\circ}\text{C}/\text{h})$ ：

$$\lg v_{PF} = 6.36 - 0.43\omega_{C} + 0.49\omega_{Mn} + 0.78\omega_{Ni} + 0.26\omega_{Cr} + 0.38\omega_{Mo} + 0.0019P_A$$

式中  $P_A$ ——奥氏体化参数(加热时间 $\times$ 加热温度)。

适用条件： $\omega_{C} \leq 0.5\%$ ， $\omega_{Mn} \leq 1.75\%$ ， $\omega_{Ni} \leq 3.0\%$ ， $\omega_{Cr} \leq 2.25\%$ ， $\omega_{Mo} \leq 1.0\%$ ， $\omega_{Mn} + \omega_{Ni} + \omega_{Cr} + \omega_{Mo} \leq 5.0\%$ 。

## 三、钢预冷淬火时空气预冷时间 $t_y$ (s) 和 $M_s$ 点以上分级冷却时间 $t_f$ (s) 的计算

$$t_y = 12 + (3 \sim 4)D$$

$$t_f = 30 + 5D$$

式中  $D$ ——淬火工件危险截面厚度(mm)。

## 四、钢的淬火硬度计算

(1) 钢终端淬火试验时，距试样顶端 4~40 mm 范围内各点硬度  $H_{4-40}$  (HRC)：

$$H_{4-40} = 88\sqrt{\omega_{C} \times 100} - 0.0135E^2\sqrt{\omega_{C} \times 100} + 19\sqrt{\omega_{Cr} \times 100} + 6.3\sqrt{\omega_{Ni} \times 100} + 16\sqrt{\omega_{Mn} \times 100} \\ + 35\sqrt{\omega_{Mo} \times 100} + 5\sqrt{\omega_{Si} \times 100} - 0.82G - 20\sqrt{E} + 2.11E - 2$$

式中  $E$ ——到顶端距离(mm)；

$G$ ——奥氏体晶粒度。

(2) 钢的最高淬火硬度，即淬火钢获得 90%M 时的硬度  $H_n$  (HRC)：

$$H_n = 30 + 50\omega_{C}$$

(3) 钢的临界淬火硬度，即淬火钢获得 50%M 时的硬度  $H_L$  (HRC)：

$$H_L = 24 + 40a_C$$

(4) 钢的淬火组织为马氏体的硬度  $H_M$  (HV):

$$H_M = 127 + 949a_C + 27a_{Si} + 11a_{Mn} + 8a_{Ni} + 16a_{Cr} + 21 \lg v_M$$

(5) 钢的淬火组织为贝氏体的硬度  $H_B$  (HV):

$$H_B = -323 + 185a_C + 330a_{Si} + 153a_{Mn} + 65a_{Ni} + 144a_{Cr} + 191a_{Mo} \\ + \lg v_B (89 + 54a_C - 55a_{Si} - 22a_{Mn} - 10a_{Ni} - 20a_{Cr} - 33a_{Mo})$$

适用条件:  $a_C \leq 0.5\%$ ,  $a_{Mn} \leq 1.75\%$ ,  $a_{Ni} \leq 3.0\%$ ,  $a_{Cr} \leq 2.25\%$ ,  $a_{Mo} \leq 1.0\%$ ,  $a_{Mn} + a_{Ni} + a_{Cr} + a_{Mo} \leq 5.0\%$ 。

## 五、钢回火后的硬度计算

(1) 钢淬火组织为马氏体的回火硬度  $H_M$  (HV):

$$H_M = -74 - 434a_C - 368a_{Si} + 15a_{Mn} + 37a_{Ni} + 17a_{Cr} - 335a_{Mo} - 2235a_V \\ + (10^3/P_B)(260 + 616a_C + 3321a_{Si} - 21a_{Mn} - 35a_{Ni} - 11a_{Cr} + 352a_{Mo} + 2345a_V)$$

(2) 钢淬火组织为贝氏体的回火硬度  $H_B$  (HV):

$$H_B = 262 + 162a_C - 349a_{Si} - 64a_{Mn} - 6a_{Ni} - 186a_{Cr} - 485a_{Mo} - 857a_V \\ + (10^3/P_B)(-149 + 43a_C + 336a_{Si} + 79a_{Mn} + 16a_{Ni} + 196a_{Cr} + 498a_{Mo} + 1094a_V)$$

式中  $P_B$ ——回火参数(回火温度 $\times$ 回火时间,此处时间为1h)。

适用条件:  $a_C \leq 0.83\%$ ,  $a_{Mn} \leq 2.0\%$ ,  $a_{Si} \leq 1.0\%$ ,  $a_{Cr} \leq 2.0\%$ ,  $a_{Mo} \leq 1.0\%$ ,  $a_{Ni} \leq 3.0\%$ ,  $a_V \leq 0.5\%$ ,  $a_{Mn} + a_{Ni} + a_{Cr} + a_{Mo} \leq 5.0\%$ 。

(3) 钢回火后的硬度回归方程:

$$HRC = 75.5 - 0.094T + 6.66a_C$$

式中  $T$ ——回火温度。

(4) 45 钢回火后硬度的回归方程:

$$HV = 640 - (T - 200)1.05 - (\lg t - 1.28) \times 36.6 + (T - 200)(\lg t - 1.28) \times 0.036$$

$$200 \leq T \leq 400$$

$$HV = 17.2 \times 10^4 / T - (\lg t - 1.28)29.4 - (T - 400)(\lg t - 1.28)0.014$$

$$400 \leq T \leq 600$$

式中  $t$ ——回火时间(min)。

(5) 钢的回火温度的估算(适用于碳素钢):

$$T = 200 + R(600 - X)$$

式中  $X$ ——回火后硬度值 HRC;

$R$ ——待定系数,对于 45 钢,  $X > 30$  HRC,  $R = 11$ ;  $X \leq 30$  HRC,  $R = 12$ 。

## 参考文献

- [1] 樊东黎. 热处理技术数据手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [2] 中国机械工程学会热处理学会. 热处理手册[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2001
- [3] 张玉庭. 热处理技师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [4] 樊东黎, 徐跃明, 佟晓辉等. 热处理工程师手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [5] 徐天祥, 樊新民. 热处理工常用技术手册[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2001
- [6] 叶卫平, 张覃铁. 热处理实用数据速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006
- [7] 夏国华, 杨树蓉. 现代热处理实用技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999
- [8] 蔡美良, 丁惠麟, 孟沪龙. 新编工模具钢金相热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [9] 劳动和社会保障部教材办公室, 上海市职业培训指导中心. 热处理工(初级)[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2005
- [10] 徐自立. 高温金属材料的性能、强度设计及工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- [11] 宋涛, 顾军. 热处理工工作手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007
- [12] 康大韬, 叶国斌. 大型锻件材料及热处理[M]. 北京: 龙门书局, 1998
- [13] 王殿刚, 杨和林等. 铸铁轧辊生产[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1988
- [14] 全国热处理标准化技术委员会. 金属热处理标准应用手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [15] 冯晓曾, 王家瑛, 何世禹. 提高模具寿命指南——选材及热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [16] 徐进, 陈再枝, 林慧国等. 模具材料应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001
- [17] 林慧国, 火树鹏, 马绍涂等. 模具材料应用手册[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [18] 赵昌盛. 实用模具材料应用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [19] 王德文等. 提高模具寿命应用实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [20] 李泉华. 热处理技术 400 问解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [21] 上海工具厂. 刀具热处理[M]. 上海: 上海人民出版社, 1971
- [22] 郭耕三. 高速钢热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985
- [23] 薄鑫涛. 塑料模具钢的种类和选择[J]. 热处理, 2007, 17(4): 48-55
- [24] 薄鑫涛等. 延长 SCrNiMo 钢热锻模寿命的探讨[J]. 热处理, 2004, 19(1): 42-44
- [25] 田部博辅. 新しい热间工具钢の动向[J]. 特殊钢(日), 2004, 53(6): 5-11
- [26] 潘晓华, 朱祖昌. H13 热作模具钢的化学成分及其改进和发展研究[J]. 模具制造, 2006, 4: 78-85
- [27] 李忠民. 4Cr5MoSiV1 铝合金压铸模零件高纯氮回充真空气淬及高温回火[J]. 机械工人(热加工), 2005, 5: 42-44
- [28] 张宏康. H13 钢的真空热处理[J]. 热处理, 2006, 21(3): 38-43
- [29] 刘笑莲. 高品质热作模具钢 SWPH13 的性能研究[J]. 热处理, 2006, 21(2): 31-35
- [30] 中国冶金百科全书总编委员会. 中国冶金百科全书(金属材料卷)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001
- [31] 桂立丰, 曹用涛. 机械工程材料测试手册(力学卷)(化学卷)[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2001
- [32] 李光瑾. 金属热处理工(技师, 高级技师技能)[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2005
- [33] 田蔚, 李秀臣, 刘正堂. 金属物理性能[M]. 北京: 航空工业出版社, 1994
- [34] 中国第一汽车集团公司编写组. 机械工程材料手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [35] 胡志忠. 钢及其热处理曲线手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986
- [36] 安运铮. 热处理工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982

- [37] 谢志强. 企业污染控制与绿色经营实务全书[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000
- [38] 赵培录, 吕亮功. 安全技术与管理[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006
- [39] 黄岳元, 保宇. 化工环境保护与安全技术概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- [40] 刘艺林, 费国忠. 突发灾祸与现场急救[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003
- [41] 徐晓楠. 灭火剂与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- [42] 冀和平, 崔慧峰. 防火防爆技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [43] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996
- [44] 北京市节能环保服务中心. 企业节能读本[M]. 北京: 经济日报出版社, 2006
- [45] 许群. 环境、化学与可持续发展[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [46] 彭平生. 绿色热处理——上海热处理行业的可持续发展之路[J]. 热处理, 2004, 19(3): 12 - 16
- [47] 刘超, 刘永可. 绿色热处理(新技术新工艺)[J]. 热加工技术, 2004, 7: 35 - 37
- [48] 凌国甲. 轴承行业既要节能也要环保[J]. 现代零部件, 2006, 12: 38 - 40
- [49] 沈庆通. 感应热处理问答[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [50] 林信智等. 汽车零部件感应热处理工艺与设备[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998
- [51] 刘新佳, 王建中. 高级热处理工技术与实例[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2007
- [52] 上海职业指导培训中心. 热处理工技能快速入门[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 2007
- [53] 王进汝. 电厂金属材料[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007
- [54] 崔忠析, 覃耀春. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007
- [55] 林慧国, 林钢, 吴静雯. 袖珍世界钢号手册[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [56] 张玉龙, 赵中魁. 实用轻金属材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- [57] 劳动和社会保障部教材办公室, 上海市职业培训指导中心. 热处理工(中级)[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2006
- [58] 朱培瑜. 常见零件热处理变形与控制. 北京: 机械工业出版社, 1990
- [59] 周学熙. 钢的淬火临界直径一百例. 金属热处理, 1981, 9: 49 - 51
- [60] 黄春峰. 钢的热学性能及热处理工艺经验公式. 热处理, 1998, 4: 12 - 17
- [61] 樊东黎. 热加工工艺规范[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [62] 姜江, 彭其风. 表面淬火技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- [63] A. K. Sinha. Physical Metallurgy Handbook [M]. New York: McGraw - Hill companies, 2003
- [64] D. A. Glocker, S. I. Shah. Handbook of Thin Film Process Technology[M], part B, Chemical Deposition Techniques. London: Iop Publishing Ltd., 1995
- [65] 胡明娟等. 钢铁化学热处理原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996
- [66] 李鹏兴等. 表面工程[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1989
- [67] 徐启阳等. 高功率连续 CO<sub>2</sub> 激光器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000
- [68] 中井贞雄. 激光工程(熊纛译)[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [69] J. D. Magumdar. Prospects and Future Applications For Diode Lasers in Surface Engineering[J]. Surface Engineering, 2007, 23(2): 73
- [70] 黄守伦. 实用化学热处理与表面强化新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002
- [71] 樊东黎等. 中国材料工程大典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- [72] 戴达煌等. 现代材料表面技术科学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004
- [73] 阎承沛. 真空热处理工艺与设备设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [74] 孟昭智. 真空技术手册. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1985
- [75] 达道安. 真空设计手册[M]. 3版. 北京: 国防工业出版社, 2006
- [76] 刘家仁, 濮绍雄. 真空热处理与设备[M]. 北京: 宇航出版社, 1984
- [77] 蔡红. 实用钢铁热处理手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983
- [78] 马登杰, 韩立民. 真空热处理原理与工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988

- [ 79 ] 张宏康. 高速钢齿轮滚刀的高压气淬真空热处理[J]. 金属热处理学报, 1999, 20(增刊): 572 - 573
- [ 80 ] Jeffrey A. Conybear. Vacuum Hardening of H13 die steel: Experience with Convective Assisted Heating and Isothermal Holding in Regard to Distortion and Metallurgical Properties [J]. Industrial Heating. 1993, 8
- [ 81 ] 第一机械工业部设计总院,《可控气氛热处理》编写组. 可控气氛热处理—应用与设计—(上册、下册). 北京: 机械工业出版社, 1982
- [ 82 ] R. 纳门伊, 可控气氛热处理. 杜豪年等译. 北京: 宇航出版社出版, 1984
- [ 83 ] Ю. М. 拉赫金等. 机械制造中的热处理手册. 史美堂等译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1986
- [ 84 ] 美国金属学会. 金属手册. 中国机械工程学会热处理专业学会主译. 9 版. 北京: 机械工业出版社, 1988
- [ 85 ] 曾祥模. 热处理炉. 西安: 西北工业大学出版社, 1989
- [ 86 ] 上海市机械制造工艺研究所. 金相分析技术[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1987
- [ 87 ] 陈南平等. 机械零件失效分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [ 88 ] 国家机械工业委员会. 失效分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988
- [ 89 ] 鞍钢钢铁研究所, 沈阳钢铁研究所. 实用冶金分析 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1990
- [ 90 ] 高汉文, 任颂赞. 工厂理化测试手册[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1994
- [ 91 ] 劳动部培训司. 工业化学分析工[M]. 北京: 中国劳动出版社, 1995
- [ 92 ] 杭州大学化学系分析化学教研室. 分析化学手册 化学分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997
- [ 93 ] 杭州大学化学系分析化学教研室. 分析化学手册 光谱分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998
- [ 94 ] 束德林等. 金属力学性能[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [ 95 ] 山东机械工业理化检测协会等. 工厂常用材料化学分析操作手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000
- [ 96 ] 王广生等. 金属热处理缺陷分析及案例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [ 97 ] 于世林, 苗凤琴. 分析化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001
- [ 98 ] 张士林, 任颂赞. 简明铝合金手册[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2001
- [ 99 ] 陈必友, 李启华. 工厂分析化验手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002
- [ 100 ] 廖景娱. 金属构件失效分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003
- [ 101 ] 北京矿冶研究总院测试研究所. 有色冶金分析手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004
- [ 102 ] 《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会. 超声检测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005
- [ 103 ] 屠海令, 干勇. 金属材料理化检测全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006

[ G e n e r a l I n f o r m a t i o n ]

书名 = 实用热处理手册

作者 = 上海市热处理协会编

页数 = 7 4 5

s s 号 = 1 2 0 9 5 2 5 9

出版社 = 上海科学技术出版社

封面  
书名  
版权  
前言  
目录

第一章	金属材料及热处理基础
第一节	钢的热处理基础知识
第二节	碳钢、易切削钢、铸钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺
第三节	合金结构钢的牌号、性能、临界点与热处理工艺
第四节	合金工具钢的牌号、临界点、性能与热处理工艺
第五节	特殊性能钢的牌号、性能与热处理工艺
第六节	铸铁的牌号、性能与热处理工艺
第七节	有色金属的牌号、性能与热处理工艺
第八节	铁基粉末冶金材料的牌号、性能与热处理工艺
第二章	真空热处理
第一节	真空获得技术、真空测量和真空检漏
第二节	真空热处理工艺
第三节	真空
第三章	表面改性热处理
第一节	表面加热淬火
第二节	钢的渗碳
第三节	钢的渗氮
第四节	碳氮共渗与氮碳共渗
第五节	激光热处理
第六节	气相沉积表面改性
第四章	感应热处理
第一节	感应加热原理
第二节	感应热处理工艺
第三节	感应器的选用和设计制作
第四节	感应热处理设备
第五节	感应热处理件的质量检验、常见缺陷及预防措施
第五章	控制(可控)气氛热处理
第一节	控制气氛基础知识
第二节	常用热处理气氛及其获得
第三节	控制气氛热处理炉
第四节	控制气氛热处理操作的安全
第六章	淬火冷却和冷却介质
第一节	钢的过冷奥氏体冷却转变
第二节	淬硬性和淬透性
第三节	淬火冷却烈度和淬透层深度
第四节	淬火冷却介质的选择与检测
第五节	油冷却介质
第六节	水及水溶性淬火介质
第七章	典型零件热处理
第一节	机床零件热处理
第二节	汽车、拖拉机及动力机械零件热处理
第三节	大件热处理
第四节	量、刃具热处理
第五节	模具热处理
第六节	紧固件、滚动轴承零件热处理
第七节	铍青铜弹性件热处理
第八章	热处理件的质量检测及评定分析
第一节	常用力学性能试验
第二节	硬度试验
第三节	无损探伤



第四节金相分析与评定  
第五节金属材料化学分析方法  
第六节钢的火花鉴别  
第七节热处理件相关失效分析方法

## 第九章热处理通用设备

第一节加热设备  
第二节冷却设备  
第三节辅助设施  
第四节热工仪表  
第五节筑炉材料

## 第十章热处理安全、卫生、环保要求及节能

第一节热处理生产的安全、卫生要求  
第二节热处理设备的安全、卫生要求  
第三节热处理工艺作业的安全、卫生要求  
第四节热处理安全、卫生防护技术措施及管理措施  
第五节热处理的环境保护技术要求及环保治理  
第六节节能、清洁生产及热处理的能耗

## 新技术展望

展望一用于超高强度钢的淬火 - 碳分配 - 回火 ( 沉淀 ) ( Q - P - T ) 工艺 徐祖耀  
展望二计算机模拟在热处理中的应用 潘健生顾剑锋

## 附录

附录一常用材料力学性能的名称及符号 ( 新旧标准对照 )  
附录二热处理专业名词解释  
附录三标准代号及常用计量单位  
附录四常用结构钢、工模具钢、不锈钢耐热钢和铸铁的化学成分及中外牌号对照  
附录五不锈钢、耐热钢新旧牌号对照  
附录六铸造形变铝、铜、钛、镁合金中外牌号对照  
附录七洛氏、表面洛氏、肖氏与布氏、维氏硬度换算对照  
附录八调质、轴类、套类及不同钢材套类零件热处理时需预留的加工余量  
附录九常用钢材水、油、分级、等温淬火及按表面至半马氏体组织深度所确定的临界淬火

## 直径

附录十铜的热处理工艺经验公式

## 参考文献